

Sonderdruck aus:

Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei und Flußbiologie

Herausgegeben von Prof. Dr. Hans Liebmann, München

---

Band 5

---

## Zur Biologie des belebten Schlammes

von KARL SCHERB

Aus der Bayerischen Biologischen Versuchsanstalt, München.

Vorstand: Prof. Dr. H. Liebmann

VERLAG R. OLDENBOURG

MÜNCHEN 1958



ZUR BIOLOGIE DES BELEBTEN SCHLAMMES

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde  
der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität  
zu München



vorgelegt von  
Karl Scherb  
Ansbach

1956

1. Referent: Professor Dr. H. LIEBMANN

2. Referent: Professor Dr. K. v. FRISCH

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juli 1956



# Zur Biologie des belebten Schlammes<sup>1)</sup>

VON KARL SCHERB

Bayerische Biologische Versuchsanstalt München.

Das Schlammbelevungsverfahren konnte besonders in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung erlangen. Wie beim Tropfkörperverfahren werden bei der Schlammbelevung die nicht absetzbaren Schwebestoffe und die gelösten und kolloidalen organischen Schmutzstoffe mit Hilfe von Mikroorganismen bei der Anwesenheit von Sauerstoff oxydiert und in absetzbare und mineralische Stoffe übergeführt.

Während nun die technischen Probleme dieser Reinigungsverfahren in einer großen Anzahl von Arbeiten eingehend untersucht wurden, liegen über die Lebensgemeinschaft der belebten Flocke nur wenige Untersuchungen vor, die sich teilweise auf allgemeine Feststellungen der Gattungen beschränken. Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es daher, die Lebensgemeinschaft der belebten Flocke unter möglichst verschiedenen Bedingungen zu studieren. Besonderes Augenmerk wurde auf die Änderung der Lebensgemeinschaft während der Einarbeitungszeit, bei wechselnder Abwasserbelastung, unterschiedlicher Abwasserzusammensetzung und Schlammkonzentration gerichtet, sowie ihre Reaktion auf bestimmte Zusätze zum Abwasser wie Eisen oder Aluminium beobachtet.

Bei der Schlammbelevung handelt es sich um eine konzentrierte Form der Selbstreinigung. Man ahmt die in der Natur sich abspielenden weiträumigen biologischen Prozesse auf engem Raume nach. Die Mikroorganismen, die die Reinigung des Abwassers bewirken, sind im Belevungsbecken infolge günstiger Lebensumstände in ungeheurer Zahl vorhanden. Durch künstliche Luftzufuhr wird dafür gesorgt, daß sie trotz ihrer Anhäufung stets genügend Sauerstoff vorfinden.

Nach IMHOFF (1927) hat H. W. CLARK in Boston im Jahre 1912 den Weg zu diesem Verfahren gewiesen. Er füllte Flaschen mit Abwasser und belüftete sie, wobei sich Schlamm bildete. Bei Leerung der Flaschen wurde der Schlamm zurückgelassen und mit neuem Abwasser vermischt. CLARK konnte auf diese Weise das Abwasser reinigen. FOWLER, der bei diesen Versuchen zugegen war, prüfte sie in Manchester nach und entwickelte das Schlammbelevungsverfahren in seiner heutigen Form. Die Versuche wurden nicht mehr in Flaschen als Füll-

---

<sup>1)</sup> Inaug. Diss. d. Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität München. Der Verfasser dankt Herrn Professor Dr. H. LIEBMANN für die freundliche Überlassung des Themas und für wertvolle Anregungen bei der Durchführung der Arbeit.

verfahren, sondern in Becken mit kontinuierlichem Abwasserdurchfluß durchgeführt, wobei die Belüftung des Abwassers mit Druckluft erfolgte. Das neue Abwasserreinigungsverfahren wurde von den Erfindern »activated sludge process« genannt, auf deutsch »Belebtschlammverfahren« oder »Schlammbeliebungsverfahren«. Das Schlammbeliebungsverfahren kann man in seinem Wesen mit dem Tropfkörperverfahren insofern vergleichen, als bei beiden Verfahren die gleichen Organismen für die Reinigung des Abwassers ausschlaggebend sind. Beim Tropfkörperverfahren sitzen sie in Form eines biologischen Rasens auf der Oberfläche des Tropfkörpermaterials fest, bei der Schlammbeliebung schweben sie als belebte Flocken frei im Belüftungsbecken, werden durch die aufsteigende Luft mit Sauerstoff versorgt und in Schwebelage gehalten.

Die Entwicklung des Schlammbeliebungsverfahrens hat dazu geführt, daß eine Reihe verschiedener Theorien über die sich bei diesem Verfahren abspielenden Vorgänge aufgestellt wurden. Eine Zusammenstellung der Literatur findet sich bei BRIX, IMHOFF, WELDERT (1934). Während eine Anzahl von Autoren zunächst vorwiegend chemisch-physikalische Vorgänge bei der Abwasserreinigung mit belebtem Schlamm annahmen (EDDY 1922, BAILY 1931), betonten andere bereits die Bedeutung der Organismen (BUSHWELL 1922, WELDERT 1926). Heute steht einwandfrei fest, daß sich bei der Reinigung des Abwassers vor allem biologische Vorgänge abspielen. Die Adsorption und Ausflockung der organischen Stoffe im Abwasser und ihre Oxydation ist an das Vorhandensein von Mikroorganismen, besonders Bakterien, gebunden, die mit Hilfe von Enzymen in Gegenwart von Sauerstoff den Abbau bewerkstelligen.

#### A. Die Lebensgemeinschaft des Belebtschlammes

Über die im Verlauf des Einarbeitungsprozesses im Belebtschlamm auftretenden Organismen geben HOFFMANN (1940), BARITT (1940) und BARKER (1949) Untersuchungsergebnisse bekannt. Nach HOFFMANN ist in den ersten Tagen der Einarbeitung des Schlammes eine Massenentwicklung an Flagellaten und Amöben zu beobachten. Nach etwa sechs Tagen weisen diese bereits eine deutliche Abnahme des Arten- und Individuenreichtums auf. Auch heterotriche Ciliaten, die bis dahin eine Vermehrungstendenz aufweisen, gehen allmählich zurück. Im Gegensatz dazu entwickeln sich stärker holotriche Ciliaten (hauptsächlich Paramaecium), peritriche (hauptsächlich Vorticella) und hypotriche (Euplotes charon). Diese Formen beherrschen schließlich das biologische Bild des Schlammes. Zooglooen zeigen in den ersten Tagen der Einarbeitung eine starke Zunahme und sind dann in gleichbleibender Menge anzutreffen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch BARKER (1949) und BARITT (1940), die den Einarbeitungsprozeß ausführlich schildern. Alle Beobachter, die sich dem Studium der Organismen bei der Schlammbeliebung widmeten, stimmen darin überein, daß neben den Bakterien hauptsächlich Protozoen auftreten. In geringerer Zahl werden Algen und Pilze, gelegentlich Rotatorien und

Tabelle 6

Organismen, die von verschiedenen Autoren im normalen Belebtschlamm gefunden wurden

|                             | KOLKWITZ<br>1926 | VIEHL<br>1934 | BEGGER<br>1935 | BARKER<br>1949 | gemeinsam |
|-----------------------------|------------------|---------------|----------------|----------------|-----------|
| Zoogloea ramigera           | x                | x             | x              | x              | x         |
| Spirillum undulans          | x                | —             | x              | n              | —         |
| Sphaerotilus natans         | x                | x             | x              | n              | x         |
| Beggiatoa alba              | —                | —             | x              | n              | —         |
| Oscillatoria limosa         | x                | —             | —              | n              | —         |
| Amoeba proteus              | —                | —             | x              | x              | —         |
| Amoeba radiosa              | x                | x             | —              | —              | —         |
| Amoeba limax                | x                | x             | —              | —              | —         |
| Amoeba actinos-<br>phaerium | —                | x             | —              | x              | —         |
| Cochliopodium spec.         | —                | x             | —              | —              | —         |
| Arcella vulgaris            | —                | —             | x              | —              | —         |
| Pleuromonas jaculans        | —                | —             | —              | x              | —         |
| Amphimonas spec.            | —                | x             | —              | —              | —         |
| Bodo putrinus               | x                | —             | —              | —              | —         |
| Bodo spec.                  | —                | —             | x              | —              | —         |
| Didinium nasutum            | —                | x             | —              | —              | —         |
| Lionotus fasciola           | x                | x             | x              | x              | x         |
| Lionotus anser              | —                | x             | x              | —              | —         |
| Loxodes rostrum             | x                | —             | —              | —              | —         |
| Chilodonella<br>cucullata   | x                | x             | x              | —              | —         |
| Chilodonella uncinata       | —                | x             | —              | —              | —         |
| Dysteria spec.              | —                | x             | —              | —              | —         |
| Paramaecium cau-<br>datum   | x                | x             | x              | x              | x         |
| Oxytricha pellionella       | —                | —             | x              | —              | —         |
| Oxytricha spec.             | —                | x             | x              | —              | —         |
| Stylonychia spec.           | —                | x             | x              | —              | —         |
| Euplotes spec.              | —                | x             | x              | —              | —         |
| Aspidisca costata           | x                | x             | —              | —              | —         |
| Aspidisca spec.             | x                | —             | x              | —              | —         |
| Vorticella alba             | —                | —             | x              | x              | —         |
| Vorticella putrina          | x                | —             | —              | —              | —         |
| Vorticella longifol.        | —                | —             | x              | —              | —         |
| Vorticella campanula        | —                | —             | —              | x              | —         |
| Vorticella convallaria      | x                | x             | x              | x              | x         |
| Opercularia berberina       | —                | x             | —              | —              | —         |
| Opercularia spec.           | —                | —             | —              | x              | —         |
| Epistylis plicatilis        | —                | —             | x              | x              | —         |
| Epistylis spec.             | —                | x             | —              | —              | —         |
| Carches. lachmanni          | x                | —             | x              | x              | —         |
| Podophrya fixa              | —                | x             | x              | —              | —         |
| Rotifer vulgaris            | —                | —             | x              | —              | —         |
| Aeolosoma spec.             | —                | —             | x              | —              | —         |
| Diplogaster spec.           | —                | x             | x              | —              | —         |
| Daphnia magna               | —                | —             | x              | —              | —         |

(x = vorhanden, — = nicht vorhanden, n = nicht angegeben)

Nematoden gefunden. Versucht man eine Zonierung in Lebensgemeinschaften, wie sie im Tropfkörper vorhanden ist (LIEBMANN 1949), bei der Schlammbelebungs nachzuweisen, so stellt man fest, daß der belebte Schlamm an verschiedenen Stellen einer Anlage ziemlich gleichmäßig zusammengesetzt ist. Nach BEGER (1935), LOYD (1945) und BARKER (1949) ist bei der Schlammbelebungs infolge des Schlammkreislaufes eine Zonierung in Lebensgemeinschaften kaum ausgeprägt. Die Zeit des Schlammkreislaufes ist zu kurz, um wesentliche Verschiebungen am Organismenbilde hervorzurufen. Außerdem wird das Wasserschlammgemisch durch die intensive Belüftung ständig herumgewirbelt. So weist der Schlamm an verschiedenen Stellen einer Anlage praktisch das gleiche biologische Bild auf. Der Wechsel der Lebensgemeinschaften in den einzelnen Tropfkörperzonen ähnelt nach BARKER (1949) jenem Wandel im Belebtschlamm, der von weniger wirksamem Schlamm zu wirksamem Schlamm beobachtet werden kann. Nach KOLKWITZ (1926) gehören die im Belebtschlamm neben den Bakterien vorkommenden Mikroorganismen meist zur Gruppe der Mesosaprobien, also zur mittleren Stufe der Selbstreinigung. Der eingearbeitete Belebtschlamm wird nach BARKER (1949) nur noch von wenigen Protozoenarten besiedelt, die mit großer Regelmäßigkeit und Häufigkeit auftreten. Ebenso stellt BARITT (1940) fest, daß die Lebensgemeinschaft des Belebtschlammes, abgesehen vom Einarbeitungsprozeß, wo eine Mannigfaltigkeit an Flagellaten und Amöben zu beobachten ist, wenig abwechslungsreich ist. Im eingearbeiteten Schlamm dominieren bei den Protozoen die Ciliaten. Der Schlamm wird vorwiegend von Ciliaten der Gattung *Vorticella*, *Epistylis*, *Carchesium* und *Aspidisca* besiedelt. Neben zahlreichen Zooglooen stellen sich vereinzelt Abwasserpilze ein. Nach BARITT ist im Belebtschlamm stets diese Biozönose anzutreffen. Die Belebtschlammanlage einer Industriestadt wie Milwaukee oder Manchester zeigt die nämliche Besiedlung wie die Anlage einer indischen Stadt, zum Beispiel Bangalore, die vorwiegend mit häuslichem Abwasser beschickt wird. Auch im Belebtschlamm aus Molkereiabwasser sind neben Abwasserpilzen die Ciliaten *Vorticella*, *Epistylis*, *Carchesium* und *Aspidisca* vorherrschend.

#### B. Die Protozoen als Indikatoren für die Beschaffenheit des Belebtschlammes

ARDERN und LOCKETT (zit. nach BARITT 1940) stellten schon bei den ersten Untersuchungen des belebten Schlammes fest, daß die Protozoen die Schlammbeschaffenheit und damit auch den Reinigungseffekt einer Anlage charakterisieren. Sie führen in ihren Protokollen verschiedene Schlammtypen mit der jeweils zugehörigen Protozoenfauna an.

Sehr aktiver Schlamm wird nach ARDERN und LOCKETT hauptsächlich von Ciliaten besiedelt, während Flagellaten und Amöben zurücktreten. Auch SIERP (1934) stellt fest, daß Schlamm in guter Verfassung eine bestimmte

Mindestzahl an Ciliaten enthält, wobei in erster Linie *Vorticella*, *Carchesium*, *Aspidisca* und *Loxophyllum* anzutreffen sind. Der Gehalt des Schlammes an Flagellaten und Amöben ist dabei sehr gering. TAYLOR (1930) gibt für einen erfolgreichen Fortgang des biologischen Geschehens im belebten Schlamm die bereits genannten Ciliaten *Vorticella*, *Carchesium* und *Aspidisca* an. Weiter bezeichnet dieser Autor das Sauginfusor *Podophrya fixa* als typisch für wirksamen Belebtschlamm. Die Untersuchungen HAMBURG-EISENSTEINS (1933) führten zu dem Ergebnis, daß bei gutem Reinigungseffekt, und zwar 90%  $\text{KMnO}_4$ -Abbau, die Ciliaten *Euplotes charon*, *Spirostomum teres*, *Halophrya ovum*, *Aspidisca costata* und *Opercularia coarctata* im Schlamm dominieren. Nach HORASAWA (1949) sind typische Belebtschlammformen (activated sludge type) festsitzende und an den Flocken kriechende Protozoen, z. B. *Vorticella*, *Epistylis*, *Carchesium*, *Opercularia* und *Aspidisca*. Diese leben von den Flocken und zeigen einen wirksamen Belebtschlamm an. Nach REYNOLDSON (1942) steht die Anzahl der im Belebtschlamm vorkommenden Vorticelliden in Beziehung zur Abflußqualität, wobei sich ein auffallender Zusammenhang zeigt. Wird der Abfluß der Anlage besser, dann nehmen die Vorticellidenzahlen zu. Verschlechtert sich der Anlagenabfluß, so äußert sich dies in einer Abnahme der Vorticellidenzahlen. Auf Grund dieser Beobachtung macht REYNOLDSON den Vorschlag, die Gattung *Vorticella* als Indikator zur Beurteilung der Güte von Schlammbelebungsanlagen zu verwenden. Dieser Ciliat ist infolge der festsitzenden Lebensweise sicher zu bestimmen und leicht auszuzählen. BAINES und Mitarbeiter (1953) prüften neben *Vorticella* noch andere Ciliaten auf ihre Eignung als Indikatoren, z. B. *Opercularia coarctata*, *Lionotus spec.* und *Aspidisca spec.* Die Untersuchungen ergaben folgendes: Die Anzahl der peritrichen Ciliaten des Belebtschlammes zeigten vorübergehend eine Korrelation zur Qualität des Anlagenabflusses. Die freischwimmenden Ciliaten wiesen hierzu jedoch keine Beziehung auf. Wenn man die Summe der peritrichen Ciliaten und der freischwimmenden Ciliaten berücksichtigte, ergab sich eine engere Beziehung zur Qualität des Anlagenabflusses. Bei Untersuchungen, die sich über einen Zeitraum von einem Jahr erstreckten, zeigte sich aber, daß diese Korrelation nicht stets vorhanden ist, denn verschiedene Faktoren, z. B. Abwasserkonzentration und Abwassertemperatur, beeinflussen das Auftreten der Ciliaten im Belebtschlamm.

Nach ARDERN und LOCKETT (zit. nach BARITT 1940) beherbergt Schlamm mit schlechten Eigenschaften Flagellaten und Amöben in überwiegender Zahl, während Ciliaten zurücktreten. Dieses Ergebnis stimmt mit den Erfahrungen SIERPS (1942) überein. Auch dieser stellte bei stärkerer Flagellaten- und Amöbenentwicklung eine Abnahme der Reinigungsleistung des Schlammes fest. HAMBURG-EISENSTEIN (1933) fand bei wenig befriedigender Reinigung des Abwassers neben Flagellaten und Amöben dagegen noch Ciliaten zahlreich vertreten, und zwar *Paramaecium caudatum*, *Chilodonella uncinata* und *Vorticella alba*. Nach HORASAWA (1949) zeigen die Ciliaten *Colpidium colpoda*, *Paramae-*

cium caudatum und die Flagellaten *Euglena*, *Peranema*, *Pleuromonas*, *Monadinium*, die gelegentlich im Belebtschlamm auftreten (non activated sludge type), einen Schlamm in schlechter Verfassung an.

### C. Beeinflussung der Lebensgemeinschaft durch verschiedene Faktoren

HOFFMANN (1940) und HORASAWA (1950) berichten, daß sich die Biozönose im Belebtschlamm je nach Art des anfallenden Abwassers verschieden entwickelt. Die Zusammensetzung des Abwassers wie auch Schlammkonzentration und Belastung beeinflussen die Entwicklungsmöglichkeiten der Organismen. Nach HORASAWA (1950) sind die Individuenzahlen der Protozoen im Belebtschlamm umso höher, je konzentrierter das zu reinigende Abwasser ist. Wenn die Zahl der Bakterien im Anlagenzufluß vergrößert wird, nimmt auch die Zahl der Protozoen im Schlamm zu. Die Protozoen des Belebtschlammes sind vorwiegend Bakterienfresser. Er vermutet auf Grund von Experimenten, daß 300 bis 400 Bakterien von 1 Protozoon in 6 Stunden als Nahrung aufgenommen werden. BAHR (1954) kommt auf Zahlen von 42000 Bakterien pro *Paramecium* und Stunde. Wie KOLKWITZ (1926) festgestellt hat, ändert sich die Schlammbiozönose sehr wesentlich, wenn der belebte Schlamm überlastet wird. Ein Teil der Protozoen encystiert sich. Bei den Bakterien pflegen mehr Spirillen und größere bewegliche Stäbchen aufzutreten. *Beggiatoa alba*, *Spirillum undulans* vermehren sich sehr stark, auch *Sphaerotilus natans*, *Zoogloea ramigera*, *Diplophrys archeri* und *Bodon* werden immer zahlreicher. Bei den Ciliaten aber zeigen *Aspidisca costata* und *Carchesium lachmanni* bei Überlastung eine eindeutige Abnahme. Die Lebensgemeinschaft nähert sich der polysaprophytischen Zone. Nach Aufhören der Überlastung tritt eine Rückbildung zu normalem Belebtschlamm ein. Nach MÖHLE (1955) enthält in der Anlage Wuppertal-Buchenhofen der hochbelastete Schlamm fast keine Protozoen, sondern besteht in der Hauptsache nur aus Bakterien.

Von verschiedenen Seiten wird berichtet, daß Eisen die Entwicklung der Bakterien im Belebtschlamm fördert (PHELPS 1942, JUNG 1948). Nach PHELPS und BEVAN (1942) wird durch 5—10 mg/l Eisen zum Abwasser das Wachstum der Bakterien angeregt. JUNG (1948) stellt fest, daß Eisen die biologischen Vorgänge unmittelbar beeinflußt und nicht nur einen flockenförmigen Grundstoff darstellt, auf dem sich Bakterien ansiedeln können. Auf die günstige Reaktion der Bakterien auf Eisen wird weiter von REMY (1916), BEGER (1952) u. a. hingewiesen. HORASAWA (1950) dagegen ist der Ansicht, daß die Bedeutung des Eisens bei der Schlammbelebungen nur darin besteht, den Schlamm kompakter und absetzbarer zu machen. Über die Wirkung des Eisens auf die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft des belebten Schlammes findet man in der Literatur keine Angaben.

Nach VIEHL (1932, 1933, 1934, 1940, 1950) beeinflussen Temperatur, Jahreszeit, Wasserstoffionenkonzentration und Sauerstoffverhältnisse die Schlamm-biozönose, was jedoch im Rahmen meiner Arbeit nicht eingehend behandelt wird.

Die eigenen Belebtschlammversuche wurden mit städtischem und Molkereiabwasser durchgeführt. Es sollte festgestellt werden, wie die Lebensgemeinschaft der belebten Flocke aus gewöhnlichem städtischen Abwasser und aus Molkereiabwasser unter den verschiedenen Bedingungen zusammengesetzt ist; insbesondere sollte ermittelt werden, welchen Einfluß die Eisung des Abwassers auf die Lebensgemeinschaft des belebten Schlammes ausübt. Die Reinigung des Abwassers wurde durch chemische, physikalische, biologische und bakteriologische Untersuchungsmethoden überwacht.

Der Kaliumpermanganatverbrauch wurde nach KUBEL-TIEMANN im filtrierten Rohabwasser bestimmt, da die Analyse des abgesetzten Abwassers stark schwankende Werte ergab. Falls der Ablauf des Nachklärbeckens Schwebestoffe aufwies, wurde auch dieser filtriert. Die Ermittlung des biochemischen Sauerstoffbedarfs (BSB<sub>5</sub>) erfolgte nach der Verdünnungsmethode mit zehrungsfreiem Leitungswasser und einer Bebrütungsdauer von 5 Tagen bei 20°C. Es wurden täglich NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und Eisengehalt kolorimetrisch nach HELIGE, sowie p<sub>H</sub>-Wert mit Spezial-Indikatorpapier, Durchsichtigkeit nach der SNELLschen-Probe und Durchlaufzeit durch das Belebungsbecken bestimmt. Der Sauerstoffgehalt im Belüftungsbecken wurde nach WINKLER unter Zusatz von Natriumazid ermittelt. Jeden zweiten Tag erfolgte eine Bestimmung des Schlammgehaltes im Belebungsbecken durch Wägen des Trockenrückstandes von 100 cm<sup>3</sup> Wasserschlammgemisch.

Die biologischen Untersuchungen wurden gleichzeitig mit den chemischen Untersuchungen durchgeführt. Die Organismen wurden sofort nach der Entnahme lebend mikroskopisch untersucht und die Arten bestimmt. Wenn fixiert werden mußte, geschah dies durch Osmiumsäuredämpfe. Die Anzahl der in 1 cm<sup>3</sup> Wasserschlammgemisch vorkommenden Protozoen wurde in einer 50 mm<sup>3</sup> fassenden Zählkammer ermittelt. Die Ermittlung der Keimzahlen erfolgte nach 48 stündiger Bebrütungsdauer bei 22°C auf Kieselsäurenährboden nach HETTICHE (1940). Mikroskopisch erfaßbare Bakterienkolonien, z. B. Sphaerotilus natans und Zoogloeen, wurden, da eine Einzelzählung nicht möglich ist, geschätzt, und zwar bedeuten:

|                 |     |             |      |
|-----------------|-----|-------------|------|
| nicht vorhanden | = o | sehr häufig | = sh |
| vereinzelt      | = v | massenhaft  | = m. |
| häufig          | = h |             |      |

Die übrigen Angaben gelten stets für 1 cm<sup>3</sup> Wasserschlammgemisch.

Die Versuche wurden im Kellerlabor der Bayer. Biologischen Versuchsanstalt München durchgeführt. Es stand hier Abwasser zur Verfügung, das mittels einer Pumpe direkt aus einem Hauptsammler der städtischen Kanali-

sation entnommen wurde. Das Abwasser wurde täglich einmal in ein Absetzbecken gepumpt und floß von da aus in die einzelnen Belebungsbecken (Abb. 13), wobei

- Becken 1 (3,8 l) Abwasser mit Eisenzusatz,
- Becken 2 (3,8 l) Abwasser mit Aluminiumzusatz,
- Becken 3 (8,7 l) Abwasser mit Eisenzusatz,
- Becken 4 (10 l) Abwasser ohne jeglichen Zusatz erhielten.

Die Eisenung des Abwassers erfolgte nach dem Pista-Verfahren, dem folgendes Prinzip zugrunde liegt:

In einem mit Gußeisenspänen versehenen Rührbecken (Eisenungs-Belüfter) wird Luft in feindisperser Verteilung in das Abwasser eingeführt, wobei sich

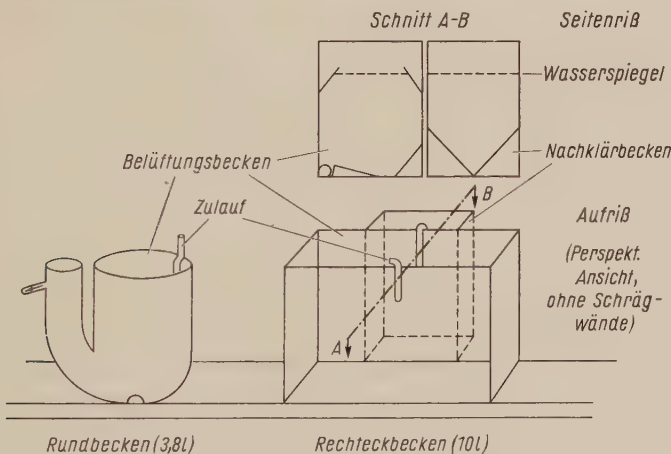
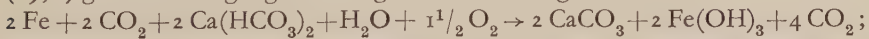


Abb. 13. Labor-Versuchsanlage für belebten Schlamm.

das Eisen unter Aufnahme von Sauerstoff zunächst in Eisen-II-hydroxyd umwandelt und dann zu Eisen-III-hydroxyd weiter oxydiert wird. Nach KUISEL (1951) geht der Vorgang nach folgender Gleichung vor sich:



Um das Eisen in Lösung zu bringen, wird ein Teil der Härte des Wassers und der freien Kohlensäure benutzt. Im allgemeinen wird nach BENDEL (1951) im Teilstrom etwa 5 v. H. des Abwassers im Eisenungs-Belüfter behandelt und der eisenhydroxydbeladene Abfluß der Hauptmenge des Abwassers zugesetzt. BENDEL (1951) empfiehlt dabei eine Eisenmenge von etwa 10% des BSB<sub>5</sub> in Lösung zu bringen, während JUNG (1948) für mittleres städtisches Abwasser eine Eisenmenge von 50 mg/l verwendet.

Bei meinen Versuchen wurde so verfahren, daß für:

Becken 1 Abwasser in einem Pistagerät geeisnet, sodann der Eisengehalt be-

stimmt und soviel ungeeignetes Abwasser zugegeben wurde, daß die Mischung eine Konzentration von 20 mg/l aufwies,

Becken 3 Abwasser im Teilstrom in einem Becherglas geeisent und das mit Eisenhydroxyd angereicherte Wasser mit dem Hauptstrom im Belüftungsbecken gemischt wurde. Der Eisengehalt der Mischung betrug bei diesem Versuch 40—50 mg/l.

Um die physiologische Wirkung des Eisens zu erkennen und die rein physikalischen Einflüsse ausschalten zu können, wurde in einem Parallelversuch dem Abwasser Aluminiumsulfat als Fällungsmittel zugesetzt. Becken 2 erhielt 10 mg/l Aluminium in Form von  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Zu Vergleichsuntersuchungen diente Becken 4, das ohne alle Zusätze betrieben wurde. Die Belüftung der Belebtschlammbecken geschah mit Druckluft, die durch Filtersteine feinblasig verteilt wurde.

Das Münchner Abwasser ist ziemlich dünn. Nach der mechanischen Vorklärung zeigt das Abwasser folgende Zusammensetzung:

|                            |           |       |
|----------------------------|-----------|-------|
| $\text{KMnO}_4$ -Verbrauch | 180 — 200 | mg/l  |
| $\text{BSB}_5$             | 200 — 250 | mg/l  |
| $\text{NH}_3$              | 16 — 20   | mg/l  |
| $\text{N}_2\text{O}_3$     | 0,3 — 0,4 | mg/l  |
| $\text{N}_2\text{O}_5$     | 4 — 5     | mg/l  |
| $\text{P}_2\text{O}_5$     | 8 — 10    | mg/l; |

Die Messung des  $p_{\text{H}}$  ergab Werte, die nur wenig um 7,4 differierten. Sauerstoff war im frischen Abwasser fast immer in geringen Mengen nachweisbar. Das den Belüftungsbecken zufließende Abwasser war meist gelblich-braun gefärbt und durch kolloide Stoffe mehr oder weniger getrübt. An unbelebten Schwebestoffen enthielt es manchmal Fleischmuskelfasern und Papierfasern, spärlicher Stärkekörnchen und Hautschuppen. Die Organismenzusammensetzung im Rohabwasser war während des ganzen Jahres relativ gleichmäßig. Das Abwasser beherbergte eine polysaprobe Lebensgemeinschaft, wie sie nach LIEBMANN (1951) typisch ist für frisches, nicht oder nur wenig angefaultes organisches Abwasser.

Jede Belebtschlammanlage benötigt zur Einarbeitung eine gewisse Zeitdauer, nach deren Verstreichen sie erst voll leistungsfähig ist. Die Versuchsanlagen konnten des öfteren während der Einarbeitungszeit, die sich über 2 bis 3 Wochen erstreckte, genauer studiert werden. In den ersten Tagen der Inbetriebnahme der Belebungsanlagen wurde eine große Mengen an Flagellaten und Amöben verschiedenster Arten beobachtet. Ciliaten wurden in mehreren Arten angetroffen, jedoch war ihre Zahl im Verhältnis zu den Flagellaten und Amöben gering. Die Lebensgemeinschaft zeigte ein vorwiegend polysaprobies Gepräge. In dem feinflockigen Schlamm dominierten die Flagellaten *Oicomonas termo*, *Trigonomonas compressa* und die Amöbe *Amoeba limax*. Bei den Ciliaten herrschten in den ersten Tagen der Einarbeitung des Schlammes *Col-*

*pidium colpoda* und *Glaucoma scintillans* vor. An ihre Stelle traten nach kurzer Zeit *Paramaecium caudatum*, *Stylonychia mytilus* und *Vorticella microstoma*, die nach etwa einer Woche in größerer Menge gefunden wurden. Nach 10 bis 12 tägiger Einarbeitungszeit traten vereinzelt Ciliatenarten auf, die bis dahin nicht beobachtet wurden. Es zeigte sich, daß sich die Lebensgemeinschaft nicht in ihrer früheren Zusammensetzung halten konnte und sich allmählich eine Lebensgemeinschaft einstellte, in der hauptsächlich  $\alpha$ - bis  $\beta$ -mesosaprobe Ciliaten dominierten. Der Schlamm beherbergte jetzt eine größere Zahl der Ciliaten *Opercularia coarctata* und *Aspidisca costata*, in geringeren Mengen traten *Paramaecium caudatum* und das Sauginfusor *Podophrya fixa* auf. Zu diesen Formen gesellten sich im eingearbeiteten Schlamm nach etwa 4 Wochen die Ciliaten *Vorticella convallaria* und *Euplotes charon*.

An mikroskopisch erfaßbaren Bakterien waren während der Einarbeitungszeit Kokken, Spirillen und vor allem Zoogloeaformen zahlreich zu finden; *Sphaerotilus natans* trat nur mit einzelnen Fäden auf. Im Verlauf der Einarbeitung nahmen die Zoogloeen stark zu.

Die Einarbeitung des belebten Schlammes vollzog sich im Winter etwas langsamer als im Sommer. Bei Versuchen im Januar dauerte die Einarbeitung hinsichtlich der Entwicklung der Lebensgemeinschaft und Reinigungswirkung etwa 3 Wochen gegenüber 2 Wochen im Sommer. Kleine Flagellaten, z. B. *Oicomonas termo* und *Trigonomonas compressa*, wurden über 4 Wochen in größerer Zahl im Belebtschlamm gefunden, während sie im Sommersversuch nur 1 bis 2 Wochen dominierten. Die Ciliaten ließen hinsichtlich ihres Auftretens gegenüber den Sommersversuchen kaum Unterschiede erkennen; ihre vorwiegenden Arten waren dieselben wie im Sommer. Keine Protozoenart wies eine deutliche Bindung an die Jahreszeit auf.

Bei den parallel betriebenen Anlagen, denen Eisen zum Abwasser zugesetzt wurde, erfolgte die Bildung des Belebtschlammes schneller. Schon nach 6 Tagen war eine Schlammkonzentration von 12 bis 16 % gegenüber 3 % beim normalen belebten Schlamm ohne Eisen vorhanden. Die Eisenflocken bildeten Ansatzflächen, an denen sich die Bakterien ansiedelten. Wie die weiter unten folgenden Keimzahlbestimmungen zeigen, war auch die Zahl der Bakterien stark vermehrt. Die für den Reinigungseffekt wichtige Schlammkonzentration wurde hier rascher erreicht. Noch günstiger lagen die Verhältnisse im Aluminiumbelebtschlamm. Auch die Aluminiumhydroxydflocken boten den Wasserbakterien willkommene Ansatzflächen. Durch Fällungsmittel wurde also die Einarbeitung des Belebtschlammes beschleunigt, wobei 10 mg/l Aluminium infolge ihrer größeren Flockenbildung eine stärkere Wirkung als 20 mg/l Eisen zeigten. Die qualitative Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft in den Becken mit Eisen- bzw. Aluminiumzusatz wies während der Einarbeitungszeit keine Unterschiede zu den Becken ohne Zusatz auf. Es kamen in allen Becken die gleichen Organismen vor. Ein anderes Bild bot sich in quantitativer Hinsicht. Die Fauna in den Becken 1 bis 3 (Eisen- bzw. Aluminiumzusatz) war viel

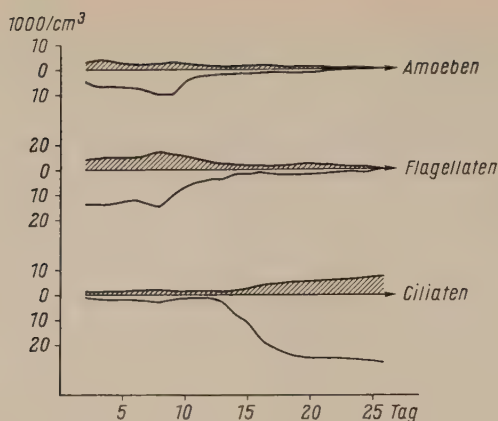


Abb. 14. Vergleich der Protozoenzahlen der Becken 3 (Eisenzusatz) und Becken 4 (ohne Zusatz) bei der Einarbeitung des Schlammes. /// = Becken 3 (40 mg/l Fe).

individuenärmer als im Becken 4 (ohne Zusatz). In Abb. 14 sind die Verhältnisse für Becken 3 (40 mg/l Eisenzusatz) und Becken 4 (ohne Zusatz) dargestellt. Im Eisenbelebtschlamm erreichte nur die Flagellatenkolonie *Anthophysa vegetans* höhere Zahlen. Von diesem Flagellaten ist bekannt, daß er ein eisenhaltiges Milieu liebt. Insgesamt findet man im Eisenbelebtschlamm weniger Protozoen; es treten hier dagegen mehr Bakterien auf. Tabelle 7 zeigt die durchschnittlichen Keimzahlen der Becken 1 bis 4 während der Einarbeitung.

Man sieht deutlich, daß die Keimzahlen in den Becken 1—3 höher liegen als im Becken 4.

Da die Belebtschlammbehandlung durch Zusatz von Fällungsmitteln beschleunigt wurde, wiesen Becken 1—3 zunächst eine höhere Schlammkonzentration als Becken 4 auf. Nach der Einarbeitung wurde die Schlammkonzentration bei den meisten Versuchen über 3000 mg/l gehalten. Die Belastung betrug hierbei zunächst 4—8 l/l/Tag; später wurde sie allmählich auf 12—16 l/l/Tag gesteigert. Der Schlamm blieb gesund und in keiner Anlage bildete sich Blähschlamm. Wie Tabelle 8 zeigt, ergaben die Versuche, daß im Eisenbelebtschlamm der Reinigungseffekt nicht besser wurde als im normalen Verfahren. Praktisch wurden bei gleicher Schlammkonzentration und gleicher Belastung dieselben

Tabelle 7

Keimzahlen bei der Einarbeitung in 1 cm<sup>3</sup>

|          |                           |           |
|----------|---------------------------|-----------|
| Becken 1 | (20 mg/l Eisenzusatz)     | 3,9 Mill. |
| Becken 2 | (10 mg/l Aluminiumzusatz) | 3,8 „     |
| Becken 3 | (40 mg/l Eisenzusatz)     | 3,9 „     |
| Becken 4 | (ohne Zusatz)             | 2,5 „     |

**Tabelle 8**  
Chemische Analysen im eingearbeiteten Schlamm

| Datum: Bek-<br>ken | KMnO <sub>4</sub> -<br>Verbr.<br>mg/l | Abbau<br>% | BSB <sub>5</sub><br>mg/l | Abbau<br>% | NH <sub>3</sub><br>mg/l | N <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>mg/l | N <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>mg/l | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>mg/l | Durch-<br>sicht.<br>cm | Schlamm-<br>konz.<br>mg/l | Belastung<br>l/l/Tag |
|--------------------|---------------------------------------|------------|--------------------------|------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|
| Zul.               | 168                                   | —          | —                        | —          | 22                      | 0,4                                   | 4,0                                   | 6                                     | 1,8                    | —                         | 3,5                  |
| 1                  | 29                                    | 82         | —                        | —          | 34                      | 0,6                                   | Sp.                                   | 2,7                                   | 20                     | 3560                      | 3,5                  |
| 2                  | 22                                    | 87         | —                        | —          | 33                      | 0,6                                   | Sp.                                   | 0,5                                   | 30                     | 3960                      | 3,4                  |
| 8.2. 3             | 27                                    | 83         | —                        | —          | 34                      | 0,1                                   | 0                                     | 0,9                                   | 18                     | 3340                      | 3,6                  |
| 4                  | 37                                    | 78         | —                        | —          | 33                      | 0,2                                   | Sp.                                   | 3,2                                   | 13                     | 2000                      | 4,0                  |
| Zul.               | 177                                   | —          | —                        | —          | 20                      | 0,8                                   | 5,0                                   | 6                                     | 1,6                    | —                         | —                    |
| 1                  | 36                                    | 80         | —                        | —          | 27                      | 1,8                                   | 4,0                                   | 2,2                                   | 20                     | 4960                      | 3,5                  |
| 2                  | 33                                    | 81         | —                        | —          | 28                      | 1,2                                   | 3,0                                   | 0,6                                   | 16                     | 4950                      | 3,5                  |
| 12.2. 3            | 30                                    | 84         | —                        | —          | 32                      | 0,2                                   | Sp.                                   | 0,8                                   | 22                     | 4980                      | 3,7                  |
| 4                  | 60                                    | 72         | —                        | —          | 33                      | Sp.                                   | Sp.                                   | 5,5                                   | 17                     | 3280                      | 3,5                  |
| Zul.               | 216                                   | —          | 206                      | —          | 18                      | 0,2                                   | 4,0                                   | 12                                    | 1,7                    | —                         | —                    |
| 1                  | 34                                    | 84         | 27                       | 87         | 32                      | 0,8                                   | Sp.                                   | 3                                     | 34                     | 4760                      | 3,5                  |
| 2                  | 30                                    | 86         | 21                       | 90         | 32                      | 0,9                                   | Sp.                                   | 1                                     | 32                     | 4000                      | 3,5                  |
| 17.2. 3            | 41                                    | 81         | 36                       | 83         | 32                      | 0,4                                   | Sp.                                   | 1,7                                   | 17                     | 4420                      | 3,2                  |
| 4                  | 42                                    | 81         | 42                       | 88         | 33                      | Sp.                                   | Sp.                                   | 7,5                                   | 18                     | 3140                      | 4,6                  |
| Zul.               | 152                                   | —          | —                        | —          | 16                      | 0,4                                   | 4,0                                   | 10                                    | 1,8                    | —                         | —                    |
| 1                  | 30                                    | 80         | —                        | —          | 30                      | 1,2                                   | Sp.                                   | 3,7                                   | 30                     | 4900                      | 4,4                  |
| 2                  | 25                                    | 83         | —                        | —          | 30                      | 0,9                                   | Sp.                                   | 1                                     | 30                     | 3160                      | 4,5                  |
| 20.2. 3            | 30                                    | 80         | —                        | —          | 32                      | 0,5                                   | Sp.                                   | 1,5                                   | 24                     | 5610                      | 4,7                  |
| 4                  | 32                                    | 79         | —                        | —          | 30                      | 0,6                                   | Sp.                                   | 6,5                                   | 27                     | 2720                      | 5,2                  |
| Zul.               | 162                                   | —          | —                        | —          | 16                      | 0,4                                   | 5,0                                   | 11                                    | 1,5                    | —                         | —                    |
| 1                  | 29                                    | 82         | —                        | —          | 32                      | 0,5                                   | Sp.                                   | 2,5                                   | 24                     | 3340                      | 4,5                  |
| 2                  | 29                                    | 82         | —                        | —          | 32                      | 0,5                                   | Sp.                                   | 1,7                                   | 20                     | 3140                      | 4,5                  |
| 26.2. 3            | 29                                    | 82         | —                        | —          | 32                      | 0,5                                   | Sp.                                   | 1,2                                   | 24                     | 4000                      | 4,1                  |
| 4                  | 37                                    | 77         | —                        | —          | 34                      | 0,4                                   | Sp.                                   | 6,0                                   | 28                     | 2760                      | 4,8                  |
| Zul.               | 128                                   | —          | 176                      | —          | 10                      | 0,5                                   | 3,0                                   | 5                                     | 1,8                    | —                         | —                    |
| 1                  | 27                                    | 79         | 16                       | 92         | 26                      | 1,2                                   | Sp.                                   | 1,5                                   | 23                     | 4420                      | 4,0                  |
| 2                  | 29                                    | 77         | 17                       | 91         | 25                      | 0,8                                   | Sp.                                   | 1,7                                   | 19                     | 4580                      | 4,5                  |
| 3.3. 3             | 26                                    | 80         | 12                       | 94         | 26                      | 2,0                                   | Sp.                                   | 0,7                                   | 24                     | 5000                      | 4,0                  |
| 4                  | 24                                    | 81         | 14                       | 92         | 26                      | 0,8                                   | Sp.                                   | 2,5                                   | 32                     | 2080                      | 3,1                  |
| Zul.               | 160                                   | —          | —                        | —          | 20                      | 0,3                                   | 4,0                                   | 10                                    | 1,4                    | —                         | —                    |
| 1                  | 30                                    | 81         | —                        | —          | 38                      | 0,6                                   | Sp.                                   | 1,7                                   | 19                     | 4360                      | 5,0                  |
| 2                  | 30                                    | 81         | —                        | —          | 38                      | 0,5                                   | Sp.                                   | 1,5                                   | 23                     | 4400                      | 5,1                  |
| 10.3. 3            | 27                                    | 83         | —                        | —          | 32                      | 1,5                                   | Sp.                                   | 1,0                                   | 26                     | 5220                      | 4,9                  |
| 4                  | 28                                    | 82,5       | —                        | —          | 38                      | 0,9                                   | Sp.                                   | 4,0                                   | 25                     | 2460                      | 4,3                  |
| Zul.               | 155                                   | —          | 211                      | —          | 16                      | 0,4                                   | Sp.                                   | 7,5                                   | 1,6                    | —                         | —                    |
| 1                  | 32                                    | 80         | 15                       | 92         | 26                      | 2,0                                   | Sp.                                   | 2,7                                   | 18                     | 5380                      | 9,0                  |
| 2                  | 30                                    | 81         | 18                       | 91         | 20                      | 3,0                                   | Sp.                                   | 0,5                                   | 21                     | 5100                      | 9,2                  |
| 18.3. 3            | 27                                    | 83         | 15                       | 92         | 23                      | 4,0                                   | Sp.                                   | 1,0                                   | 23                     | 5200                      | 5,5                  |
| 4                  | 29                                    | 81         | 14                       | 93         | 22                      | 8,0                                   | 4,0                                   | 5,0                                   | 36                     | 2600                      | 5,1                  |

**Tabelle 8** (Fortsetzung)  
Chemische Analysen im eingearbeiteten Schlamm

|         |     |      |     |    |    |     |      |      |     |      |      |
|---------|-----|------|-----|----|----|-----|------|------|-----|------|------|
| Zul.    | 177 | —    | 325 | —  | 22 | 0,7 | 8,0  | 1,4  | 1,4 | —    | —    |
| 1       | 35  | 80   | 24  | 89 | 36 | 0,9 | 4,0  | 2,5  | 28  | 6200 | 6,5  |
| 2       | 31  | 82,5 | 15  | 92 | 36 | 1,2 | 5,0  | 1,5  | 20  | 5400 | 6,3  |
| 25.3. 3 | 35  | 79   | 28  | 88 | 36 | 1,0 | 4,0  | 2,5  | 14  | 3960 | 5,6  |
| 4       | 29  | 84   | 16  | 93 | 29 | 1,6 | 14,0 | 6,0  | 40  | 4220 | 5,4  |
| Zul.    | 127 | —    | 231 | —  | 17 | 0,4 | Sp.  | 8,0  | 1,5 | —    | —    |
| 1       | 32  | 75   | 12  | 95 | 36 | 0,9 | 4,0  | 3,0  | 26  | 4480 | 13,0 |
| 2       | 32  | 75   | 14  | 94 | 35 | 0,9 | 4,0  | 1,0  | 27  | 3690 | 13,0 |
| 9.4. 3  | 43  | 66   | 42  | 82 | 36 | 0,8 | 4,0  | 1,7  | 7   | 3040 | 14,5 |
| 4       | 30  | 76   | 14  | 94 | 29 | 1,7 | 5,0  | 6,0  | 39  | 3460 | 6,0  |
| Zul.    | 165 | —    | —   | —  | 30 | 0,5 | 5,0  | 10,0 | 2,1 | —    | —    |
| 1       | 34  | 79   | —   | —  | 45 | 0,8 | 7,0  | 4,5  | 20  | 5700 | 13,0 |
| 2       | 33  | 80   | —   | —  | 50 | 0,8 | 6,0  | 1,0  | 30  | 4800 | 13,2 |
| 12.4. 3 | 41  | 75   | —   | —  | 50 | 0,9 | 6,0  | 1,7  | 21  | 4100 | 7,3  |
| 4       | 33  | 80   | —   | —  | 39 | 1,0 | 30,0 | 8,0  | 44  | 2920 | 5,0  |
| Zul.    | 202 | —    | 171 | —  | 22 | 0,6 | 6,0  | 10,0 | 1,2 | —    | —    |
| 1       | 45  | 77   | 22  | 87 | 34 | 1,2 | 6,0  | 4,0  | 24  | 5640 | 16,0 |
| 2       | 44  | 78   | 18  | 89 | 36 | 1,2 | 6,0  | 1,0  | 21  | 4940 | 16,0 |
| 23.4. 3 | 35  | 83   | 17  | 90 | 32 | 1,2 | 2,0  | 2,0  | 28  | 6200 | 8,5  |
| 4       | 43  | 79   | 12  | 93 | 26 | 2,5 | 15,0 | 7,0  | 35  | 3020 | 9,1  |

Ergebnisse erzielt. Es konnten kaum Unterschiede in der Abbauwirkung hinsichtlich Permanganatverbrauch bzw. Biochemischen Sauerstoffbedarf festgestellt werden. Bei einer Raumbelastung von 12—16 l/Tag und einer Rohwasserkonzentration von etwa 180 mg/l  $\text{KMnO}_4$ -Verbrauch enthielten die Abflüsse im Mittel bei:

|                        |                                       |
|------------------------|---------------------------------------|
| Becken 1 (20 mg/l Fe)  | 33—36 mg/l $\text{KMnO}_4$ -Verbrauch |
| Becken 2 (10 mg/l Al)  | 34—37 „ „                             |
| Becken 3 (40 mg/l Fe)  | 33—36 „ „                             |
| Becken 4 (ohne Zusatz) | 34—38 „ „                             |

Der Reinigungseffekt lag bei allen Versuchen zwischen 79% und 82%. Gelegentliche Schwankungen in der Schlammkonzentration zwischen 3000 und 6000 mg/l wirkten sich kaum auf den Reinigungseffekt aus.

Der Stickstoffabbau erfolgte im Belebtschlamm von Becken 1—3 ausgeprägter zu Ammoniak, während im Becken 4 mehr Nitrit und Nitrat gebildet wurde. Die Nitrifikation im Becken 4 dürfte auf die im Durchschnitt geringere Belastung des Schlammes zurückzuführen sein (Tab. 8: 9.4; 12.4.).

**Tabelle 9**  
Biologie des eingearbeiteten Belebtschlammes

| Datum                             |       | 8.2. |       |      |      | 12.2. |      |      |      |
|-----------------------------------|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| Becken                            |       | 1    | 2     | 3    | 4    | 1     | 2    | 1    | 4    |
| Belastung l/l/Tag                 |       | 3,4  | 3,4   | 3,6  | 4    | 3,4   | 3,4  | 3,4  | 3    |
| Schlammkonzentration mg/l         |       | 3560 | 3960  | 3340 | 1560 | 4980  | 4920 | 4980 | 3280 |
| KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch mg/l |       |      |       |      |      |       |      |      |      |
| Zulauf                            |       | 168  |       |      |      | 177   |      |      |      |
| Ablauf                            |       | 29   | 22    | 27   | 37   | 36    | 33   | 30   | 50   |
| Abbau %                           |       | 82   | 87    | 83   | 78   | 80    | 81   | 84   | 72   |
| Zoogloea ramigera                 | p—s   | v    | —     | v    | v    | —     | v    | —    | v    |
| Spirillum undulans                | p—s   | v    | —     | v    | h    | v     | v    | —    | h    |
| Sphaerotilus natans               | p—a—m | v    | v     | v    | v    | v     | v    | v    | v    |
| Chroococcus minutus               | —     | —    | —     | —    | —    | —     | —    | —    | 60   |
| Amoeba limax                      | p—s   | 20   | —     | 40   | 40   | —     | —    | —    | 20   |
| Cochliopodium pellucidum          | —     | 100  | 600   | 3000 | 5200 | 830   | 900  | 220  | 740  |
| Oicomonas termo                   | —     | 1140 | 210   | 2020 | 2140 | 600   | 100  | 170  | 300  |
| Bodo saltans                      | a—m   | —    | —     | —    | —    | 20    | —    | —    | 120  |
| Trigonomonas compressa            | p—s   | —    | —     | —    | 20   | —     | —    | —    | 50   |
| Anthophysa vegetans               | a—m   | 20   | —     | 40   | —    | 20    | —    | 20   | —    |
| Trachelophyllum pus.              | —     | 100  | 100   | 20   | 2100 | 100   | —    | —    | —    |
| Lionotus fasciola                 | a—m   | —    | —     | —    | —    | 20    | 20   | 20   | 40   |
| Lionotus hirundo                  | —     | —    | —     | 20   | 20   | —     | —    | —    | —    |
| Trochilia minuta                  | —     | —    | —     | —    | —    | 40    | 80   | 80   | 20   |
| Paramecium caudatum               | a—m   | 140  | 40    | 140  | 520  | 20    | 20   | 240  | 20   |
| Oxytricha pellionella             | —     | —    | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| Stylonychia mytilus               | —     | —    | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| Euplotes charon                   | β—m   | —    | 20    | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| Aspidisca costata                 | β—m   | 1900 | 2020  | 660  | 1540 | 6800  | 1100 | 3000 | 4210 |
| Opercularia coarctata             | a—m   | 2400 | 10000 | 580  | 1200 | 5400  | 4210 | 320  | 880  |
| Vorticella convallaria            | a—m   | —    | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| Podophrya fixa                    | a—m   | 40   | 20    | 20   | 60   | —     | —    | 20   | —    |
| Rotaria vulgaris                  | a—m   | —    | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| Eosphora najas                    | —     | 20   | 20    | 10   | 20   | 20    | —    | —    | —    |
| Diplogaster spec.                 | —     | 60   | 60    | 100  | 40   | 80    | 40   | 120  | 60   |
| Keimzahlen: Zulauf                |       | 2700 |       |      |      | 1520  |      |      |      |
| Becken                            |       | 460  | 470   | 650  | 460  | 218   | 240  | 460  | 350  |
| Ablauf                            |       | 200  | 120   | 125  | 508  | 250   | 340  | 160  | 900  |

(p—s = polysaprob, a—m = α-mesosaprob, β—m = β-mesosaprob; Keimzahlen: × 1000)

Tabelle 9 (1. Fortsetzung)

| Datum                             |       | 17.2  |       |      |       | 20.2. |       |      |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| Becken                            |       | 1     | 2     | 3    | 4     | 1     | 2     | 3    | 4     |
| Belastung l/l/Tag                 |       | 3,5   | 3,5   | 3,3  | 4,6   | 4,4   | 4,5   | 4,7  | 5,2   |
| Schlammkonzentration mg/l         |       | 4760  | 4000  | 4420 | 3140  | 4960  | 3160  | 5610 | 2720  |
| KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch mg/l |       |       |       |      |       |       |       |      |       |
| Zulauf                            |       | 216   |       |      |       | 152   |       |      |       |
| Ablauf                            |       | 34    | 30    | 41   | 42    | 30    | 25    | 30   | 32    |
| Abbau %                           |       | 84    | 86    | 81   | 81    | 80    | 83    | 80   | 79    |
| Zoogloea ramigera                 | p—s   | v     | v     | v    | v     | —     | —     | —    | —     |
| Spirillum undulans                | p—s   | v     | v     | v    | v     | —     | —     | v    | v     |
| Sphaerotilus natans               | p—a—m | v     | v     | v    | v     | v     | v     | v    | v     |
| Chroococcus minutus               | —     | 100   | 50    | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Amoeba limax                      | p—s   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Cochliopodium pel-lucidum         | —     | 6000  | 1120  | 2000 | 2400  | 5000  | 5500  | 2000 | 4000  |
| Oicomonas termo                   | —     | 5000  | 620   | 1500 | 40    | 4000  | 440   | 320  | 160   |
| Bodo saltans                      | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Anthophysa vegetans               | a—m   | —     | —     | 20   | —     | —     | —     | 60   | 20    |
| Trachelophyllum pusillum          | —     | 200   | 800   | —    | 20    | 80    | 80    | 20   | 60    |
| Trochilia minuta                  | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Lionotus fasciola                 | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Lionotus hirundo                  | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Paramaecium caudatum              | a—m   | 20    | 20    | 240  | 120   | 40    | —     | 140  | —     |
| Oxytricha pellionella             | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Stylonychia mytilus               | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Euplotes charon                   | ß—m   | 20    | —     | 40   | —     | —     | —     | —    | —     |
| Aspidisca costata                 | ß—m   | 16000 | 4440  | 6000 | 11740 | 13000 | 8000  | 9000 | 11200 |
| Opercularia coarctata             | a—m   | 10000 | 17000 | 300  | 5020  | 12000 | 11800 | 880  | 10800 |
| Vorticella con-vallaria           | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Podophrya fixa                    | a—m   | —     | —     | 20   | 20    | —     | —     | 44   | —     |
| Rotaria vulgaris                  | a—m   | 20    | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Eosphora najas                    | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Diplogaster spec.                 | —     | —     | —     | —    | —     | —     | 20    | 40   | 10    |
| Keimzahlen: Zulauf                |       | 4300  |       |      |       | 1520  |       |      |       |
| Becken                            |       | 2400  | 1100  | 1520 | 2000  | 370   | 600   | 500  | 400   |
| Ablauf                            |       | 2380  | 1000  | 1420 | 2100  | 200   | 170   | 190  | 220   |

Tabelle 9 (2. Fortsetzung)

| Datum                             |       | 26.2. |       |      |       | 3.3.  |       |      |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| Becken                            |       | 1     | 2     | 3    | 4     | 1     | 2     | 3    | 4     |
| Belastung l/l/Tag                 |       | 4,4   | 4,4   | 3,7  | 4,8   | 4     | 4,5   | 4    | 3,1   |
| Schlammkonzentration mg/l         |       | 3340  | 3140  | 4000 | 2760  | 4420  | 4560  | 5000 | 2080  |
| KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch mg/l |       | 162   |       |      |       | 128   |       |      |       |
| Zulauf                            |       |       |       |      |       |       |       |      |       |
| Ablauf                            |       | 29    | 29    | 29   | 37    | 27    | 29    | 26   | 24    |
| Abbau %                           |       | 82    | 82    | 82   | 77    | 79    | 77    | 80   | 81    |
| Zoogloea ramigera                 | p—s   | —     | —     | —    | v     | v     | v     | v    | v     |
| Spirillum undulans                | p—s   | —     | v     | —    | v     | v     | v     | —    | —     |
| Sphaerotilus natans               | p—a—m | v     | v     | v    | v     | v     | v     | v    | v     |
| Chroococcus minutus               | —     | 8000  | 4200  | 3040 | 6100  | —     | —     | —    | —     |
| Cochliopodium pellucidum          | —     | 7800  | 4000  | 3000 | 7000  | 1400  | 3400  | 3000 | 2500  |
| Oicomonas termo                   | —     | —     | —     | 1300 | 200   | 400   | 200   | —    | 20    |
| Anthophysa vegetans               | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Trachelophyllum pusillum          | —     | 20    | 40    | 20   | 40    | —     | 20    | —    | 20    |
| Trochilia minuta                  | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Lionotus fasciola                 | a—m   | —     | 20    | 20   | 20    | 40    | 10    | 10   | 20    |
| Lionotus hirundo                  | —     | —     | —     | —    | —     | —     | 20    | —    | 20    |
| Paramaecium caudatum              | a—m   | 200   | 100   | 140  | 40    | 600   | 100   | 300  | 40    |
| Oxytricha pellionella             | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Stylonychia mytilus               | —     | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Euplotes charon                   | ß—m   | —     | —     | —    | —     | 20    | —     | —    | 20    |
| Aspidisca costata                 | ß—m   | 18400 | 14000 | 8000 | 20000 | 20000 | 16000 | 30   | 22000 |
| Opercularia coarctata             | a—m   | 4000  | 4200  | 240  | 4000  | 500   | 560   | 2000 | 2800  |
| Podophrya fixa                    | a—m   | 40    | 20    | 40   | 40    | 60    | 20    | 40   | —     |
| Rotaria vulgaris                  | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Diplogaster spec.                 | —     | —     | 20    | 20   | 40    | —     | —     | —    | —     |
| Keimzahlen: Zulauf                |       | 880   |       |      |       | 710   |       |      |       |
| Becken                            |       | 700   | 550   | 800  | 470   | 800   | 780   | 820  | 590   |
| Ablauf                            |       | 70    | 80    | 90   | 100   | 80    | 81    | 79   | 90    |

Tabelle 9 (3. Fortsetzung)

| Datum                             |       | 10.3. |       |      |       | 18.3. |       |      |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| Becken                            |       | 1     | 2     | 3    | 4     | 1     | 2     | 3    | 4     |
| Belastung l/l/Tag                 |       | 5,0   | 5,1   | 4,7  | 4,3   | 9     | 9,2   | 5,5  | 5,1   |
| Schlammkonzentration mg/l         |       | 3340  | 4400  | 5220 | 2680  | 5380  | 5100  | 5200 | 2600  |
| KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch mg/l |       |       |       |      |       |       |       |      |       |
| Zulauf                            |       | 160   |       |      |       | 155   |       |      |       |
| Ablauf                            |       | 30    | 30    | 27   | 28    | 32    | 30    | 27   | 29    |
| Abbau %                           |       | 81    | 81    | 83   | 82    | 80    | 81    | 83   | 81    |
| Zoogloea ramigera                 | p—s   | v     | v     | v    | h     | —     | —     | —    | —     |
| Spirillum undulans                | p—s   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Sphaerotilus natans               | p—a—m | v     | v     | v    | h     | h     | h     | v    | h     |
| Chroococcus minutus               | —     | 3000  | 1400  | 1500 | 200   | 3000  | 2000  | 1400 | 700   |
| Amoeba limax                      | p—s   | 20    | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Cochliopodium pel-lucidum         | —     | 1400  | 1540  | 1400 | 5000  | 3000  | 2000  | 1400 | 700   |
| Oicomonas termo                   | —     | —     | 120   | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Anthophysa vegetans               | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Trachelophyllum pusillum          | —     | 40    | 80    | 20   | 20    | 100   | 20    | 80   | 100   |
| Lionotus fasciola                 | a—m   | 50    | 60    | —    | 20    | 20    | 20    | 100  | 20    |
| Lionotus hirundo                  | —     | —     | —     | 100  | —     | —     | 20    | 20   | 40    |
| Paramaecium caudatum              | a—m   | 300   | 280   | —    | 180   | 200   | 200   | 100  | 20    |
| Oxytricha pellionella             | —     | —     | —     | 120  | 40    | —     | —     | —    | —     |
| Stylonychia mytilus               | —     | 20    | —     | —    | 120   | —     | —     | —    | —     |
| Euplotes charon                   | ß—m   | —     | —     | 40   | 20    | —     | —     | 20   | 100   |
| Aspidisca costata                 | ß—m   | 9200  | 19000 | 8600 | 12800 | 10000 | 14000 | 4000 | 30000 |
| Opercularia coarctata             | a—m   | 1500  | 300   | 440  | 9000  | 300   | 1320  | 940  | 9800  |
| Vorticella convallaria            | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Podophrya fixa                    | a—m   | 40    | 40    | 60   | 20    | 40    | 40    | 40   | 20    |
| Rotaria vulgaris                  | a—m   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     |
| Diplogaster spec.                 | —     | —     | —     | —    | —     | 20    | —     | 80   | —     |
| Keimzahlen: Zulauf                |       | 1520  |       |      |       | 1670  |       |      |       |
| Becken                            |       | 490   | 560   | 690  | 350   | 1200  | 1008  | 1240 | 460   |
| Ablauf                            |       | 250   | 240   | 140  | 210   | 540   | 490   | 610  | 150   |

Tabelle 9 (4. Fortsetzung)

| Datum                             |       | 25. 3. |       |      |       | 9. 4. |      |      |      |
|-----------------------------------|-------|--------|-------|------|-------|-------|------|------|------|
| Becken                            |       | 1      | 2     | 3    | 4     | 1     | 2    | 3    | 4    |
| Belastung l/l/Tag                 |       | 6,3    | 6,3   | 5,6  | 5,4   | 9,2   | 13   | 14   | 6    |
| Schlammkonzentration mg/l         |       | 6200   | 5400  | 3960 | 4220  | 4480  | 3690 | 3040 | 3460 |
| KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch mg/l |       | 177    |       |      |       | 127   |      |      |      |
| Zulauf                            |       | 35     | 31    | 35   | 29    | 32    | 32   | 43   | 30   |
| Ablauf                            |       | 80     | 82,5  | 80   | 84    | 75    | 75   | 66   | 76   |
| Abbau %                           |       | 80     | 82,5  | 80   | 84    | 75    | 75   | 66   | 76   |
| Zoogloea ramigera                 | p—s   | —      | —     | —    | —     | v     | v    | v    | v    |
| Spirillum undulans                | p—s   | v      | —     | —    | —     | v     | v    | v    | v    |
| Sphaerotilus natans               | p—a—m | h      | h     | h    | h     | h     | h    | h    | h    |
| Chroococcus minutus               | —     | —      | —     | 3000 | 200   | 2000  | 400  | 3840 | 8000 |
| Amoeba limax                      | p—s   | —      | —     | —    | —     | 40    | —    | 120  | 40   |
| Cochliopodium pellucidum          | —     | 2500   | 3400  | 1600 | 8800  | 500   | —    | 2400 | 1420 |
| Oicomonas termo                   | —     | 3000   | 114   | —    | 400   | 40    | 520  | 1200 | 60   |
| Anthophysa vegetans               | a—m   | —      | —     | —    | —     | —     | —    | 120  | —    |
| Trachlophyllum pusillum           | —     | 60     | 40    | 40   | 60    | —     | —    | —    | —    |
| Lionotus fasciola                 | a—m   | —      | —     | 40   | 100   | —     | —    | —    | —    |
| Lionotus hirundo                  | —     | —      | —     | —    | —     | 20    | —    | 20   | 20   |
| Paramecium caudatum               | a—m   | 300    | 340   | 380  | 100   | 340   | 520  | 120  | —    |
| Oxytricha pellionella             | —     | 20     | 40    | —    | 40    | —     | —    | —    | —    |
| Stylonychia mytilus               | —     | —      | —     | 40   | 100   | —     | —    | —    | —    |
| Euplotes charon                   | ß—m   | —      | —     | —    | —     | —     | —    | —    | —    |
| Aspidisca costata                 | ß—    | 16000  | 14000 | 1400 | 40000 | 11800 | 800  | 2000 | 40   |
| Opercularia coarctata             | a—m   | 1600   | 2500  | 280  | 5000  | 6000  | 1200 | 340  | 7000 |
| Vorticella convallaria            | a—m   | —      | —     | —    | —     | 120   | 240  | 60   | 8000 |
| Podophrya fixa                    | a—m   | 20     | 40    | 40   | 20    | 20    | 40   | —    | —    |
| Rotaria vulgaris                  | a—m   | —      | —     | —    | —     | —     | —    | —    | —    |
| Diplogaster spec.                 | —     | 40     | 40    | —    | 20    | 80    | 60   | 60   | 80   |
| Keimzahlen: Zulauf                |       | 1050   |       |      |       | 1640  |      |      |      |
| Becken                            |       | 1040   | 1400  | 960  | 680   | 1250  | 1140 | 1460 | 640  |
| Ablauf                            |       | 180    | 140   | 170  | 120   | 470   | 560  | 1000 | 120  |

Tabelle 9 (5. Fortsetzung)

| Datum                             | 12. 4. |       |      |       | 23. 4. |       |       |       |
|-----------------------------------|--------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Becken                            | 1      | 2     | 3    | 4     | 1      | 2     | 3     | 4     |
| Belastung l/l/Tag                 | 13     | 13,2  | 7,3  | 5     | 16     | 16    | 9,5   | 9,1   |
| Schlammkonzentration mg/l         | 5700   | 4800  | 4100 | 2980  | 5640   | 4940  | 6200  | 3001  |
| KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch mg/l |        |       |      |       |        |       |       |       |
| Zulauf                            | 165    |       |      |       | 202    |       |       |       |
| Ablauf                            | 34     | 33    | 41   | 33    | 45     | 44    | 35    | 43    |
| Abbau %                           | 79     | 80    | 75   | 80    | 77     | 78    | 83    | 79    |
| Zoogloea ramigera                 | p—s    | v     | v    | h     | h      | h     | h     | h     |
| Spirillum undulans                | p—s    | —     | —    | —     | —      | —     | —     | —     |
| Sphaerotilus natans               | p—a—m  | h     | h    | h     | h      | h     | h     | h     |
| Chroococcus minutus               | —      | 10000 | 5000 | 16000 | 400    | 7000  | 4000  | 2600  |
| Amoeba limax                      | p—s    | —     | —    | 280   | 80     | —     | —     | —     |
| Cochliopodium pellucidum          | —      | 900   | 400  | 2000  | 500    | 1000  | 1220  | 240   |
| Oicomonas termo                   | —      | —     | —    | —     | —      | —     | —     | —     |
| Anthophysa vegetans               | a—m    | —     | —    | —     | —      | —     | —     | —     |
| Trigonomonas compressa            | p—s    | —     | —    | 2800  | —      | —     | —     | —     |
| Polytoma uvella                   | —      | —     | —    | —     | —      | —     | —     | —     |
| Trachelophyllum pusillum          | —      | —     | —    | —     | 20     | —     | —     | 460   |
| Lionotus fasciola                 | a—m    | —     | —    | —     | —      | 20    | —     | 40    |
| Lionotus hirundo                  | —      | —     | —    | —     | —      | —     | —     | —     |
| Trochilia minuta                  | —      | —     | —    | —     | —      | —     | —     | —     |
| Paramaecium caudatum              | a—m    | —     | 560  | 120   | 80     | 60    | 120   | 60    |
| Oxytricha pellionella             | —      | —     | —    | —     | —      | —     | 80    | 140   |
| Stylonychia mytilus               | —      | —     | —    | —     | —      | —     | —     | —     |
| Euplotes charon                   | β—m    | —     | —    | —     | —      | —     | —     | 40    |
| Aspidisca costata                 | β—     | 1200  | 8000 | 300   | 40     | 16800 | 16000 | 15000 |
| Opercularia coarctata             | a—m    | 6000  | 1400 | 2260  | 8000   | 7980  | 2420  | 2800  |
| Vorticella convallaria            | a—m    | —     | —    | —     | 7980   | —     | 1520  | 20    |
| Podophrya fixa                    | a—m    | —     | 60   | 20    | 20     | —     | 40    | 100   |
| Rotaria vulgaris                  | a—m    | —     | —    | —     | —      | —     | 20    | —     |
| Diplogaster spec.                 | —      | —     | 40   | 60    | 80     | 80    | 80    | 40    |
| Keimzahlen: Zulauf                | 2240   |       |      |       | 1040   |       |       |       |
| Becken                            | 1510   | 1410  | 870  | 340   | 1150   | 1610  | 1970  | 780   |
| Ablauf                            | 500    | 420   | 90   | 50    | 290    | 260   | 220   | 390   |

Auffallend war der starke Rückgang des Phosphatgehaltes in den mit Eisen- bzw. Aluminiumzusatz betriebenen Anlagen. Im Ablauf von Becken 4 (ohne Zusatz) lagen die Phosphatwerte bedeutend höher. Der Phosphatgehalt des Anlagenzulaufs von durchschnittlich 8—10 mg/l sank im Ablauf von

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| Becken 1 (20 mg/l Fe)  | auf 2,8 mg/l $P_2O_5$ |
| Becken 2 (10 mg/l Al)  | „ 1,3 mg/l „          |
| Becken 3 (40 mg/l Fe)  | „ 1,6 mg/l „          |
| Becken 4 (ohne Zusatz) | „ 5,8 mg/l „          |

Der Unterschied im Phosphatgehalt des Ablaufes dürfte rein chemisch bedingt sein, denn durch den Aluminiumzusatz bzw. Eisenzusatz zum Abwasser wird ein großer Teil der Phosphationen ausgefällt und mit dem Schlamm aus dem Abwasser entfernt.

Die Durchsichtigkeit des gereinigten Abwassers war bei Becken 4 (ohne Zusatz) höher als bei den Becken 1—3 (Eisen- bzw. Aluminiumzusatz). Dieses Ergebnis ist auf die höheren Protozoenzahlen des normalen Belebtschlammes gegenüber Belebtschlamm mit Eisen- oder Aluminiumzusatz zurückzuführen, worüber unten ausführlich berichtet wird.

Nach der Abnahme der Flagellaten und Amöben im Verlauf der Einarbeitung, beherrschten im eingearbeiteten Belebtschlamm Ciliaten das biologische Bild. Es hatte sich eine Lebensgemeinschaft eingestellt, die vorwiegend aus wenigen Ciliatenarten bestand, die mit großer Regelmäßigkeit und Häufigkeit anzutreffen waren. Besonders charakteristisch für diese Lebensgemeinschaft waren die Ciliaten *Opercularia coarctata*, *Aspidisca costata* und zeitweilig *Vorticella convallaria* (Tab. 9). Sämtliche Tiere sind Bakterienfresser. Bei Massenentwicklung konnten wiederholt 20000—30000 Individuen im Kubikzentimeter Wasserschlammmischgehalt gezählt werden. Die Abbildungen 15—17 zeigen in Mikrophotographien diese typischen Ciliaten, wie man sie bei der mikroskopischen Kontrolle im belebten Schlamm findet. Mit den genannten Arten gemeinsam, wenn auch in wesentlich gerin-

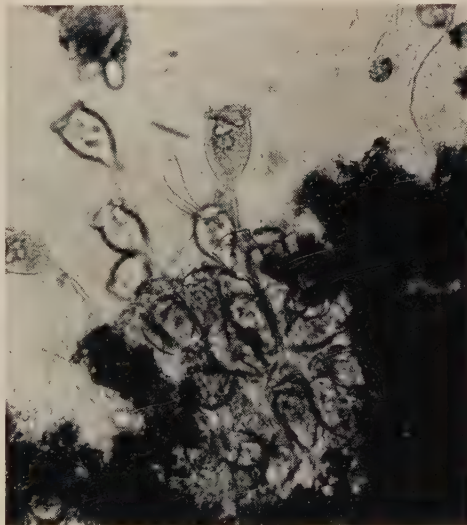


Abb. 15. Belebtschlammflocke mit dem  $\alpha$ -meso-  
proben Ciliaten *Vorticella convallaria*. Vergröße-  
rung 350fach.

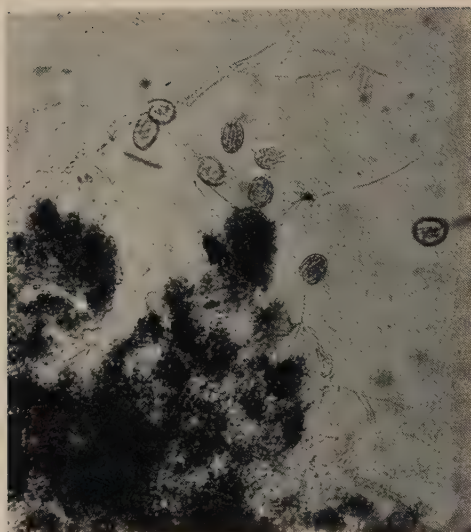


Abb. 16. Belebtschlammflocke mit dem  $\beta$ -mesosaproben Ciliaten *Aspidisca costata*.  
Vergrößerung 350fach.

gerer Zahl, lebten meist *Paramecium caudatum*, *Lionotus fasciola*, *Oxytricha pellionella*, *Euplotes charon* und das Sauginfusor *Podophrya fixa*, wobei selten mehr als 500 Individuen im Kubikzentimeter gezählt wurden. Para-



Abb. 17. Belebtschlammflocke mit dem  $\alpha$ -mesosaproben Ciliaten *Opercularia coarctata*.  
Vergrößerung 350fach.

Tabelle 10

Einfluß der Zusätze auf die quantitative Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft. Durchschnitt aller Beobachtungen vom 15. 2. 1953 bis 5. 6. 1954 (Individuenzahlen/cm<sup>3</sup>).

| Becken                   | 1     | 2      | 3     | 4     |
|--------------------------|-------|--------|-------|-------|
| Zusatz                   | Fe    | Al     | Fe    | ohne  |
| mg/l                     | 20    | 10     | 40    | —     |
| Zoogloeen                | m     | m      | m     | m     |
| Spirillum undulans       | v     | v      | v     | v     |
| Sphaerotilus natans      | v     | v      | v     | v     |
| Chroococcus minutus      | 1073  | 1130   | 636   | 1260  |
| Cochliopodium pellucidum | 1144  | 2832   | 1876  | 2600  |
| Oicomonas termo          | 1491  | 1574   | 864   | 1662  |
| Anthophysa vegetans      | 2     | 1      | 51    | —     |
| Trachelophyllum pusillum | 17    | 17     | 14    | 64    |
| Lionotus fasciola        | 12    | 32     | 15    | 62    |
| Paramaecium caudatum     | 184   | 140    | 260   | 187   |
| Uronema marinum          | 2     | 4      | 1     | 4     |
| Oxytricha pellionella    | 11    | 10     | 5     | 21    |
| Stylonychia mytilus      | 5     | 3      | 6     | 10    |
| Euplotes charon          | 5     | 4      | 3     | 42    |
| Aspidisca costata        | 14829 | 12840  | 5572  | 17576 |
| Opercularia coarctata    | 3343  | 2828   | 1075  | 5778  |
| Vorticella convallaria   | 1344  | 347    | 320   | 2518  |
| Podophrya fixa           | 14    | 18     | 45    | 18    |
| Rotaria vulgaris         | 5     | 12     | 6     | 35    |
| Eosphora najas           | 2     | 2      | 1     | 5     |
| Diplogaster spec.        | 38    | 28     | 29    | 39    |
| Ciliatenzahl             | 19752 | 162225 | 7271  | 26262 |
| Protozoenzahl            | 22389 | 20631  | 10062 | 30526 |

maecium caudatum und Euplotes charon sind Bakterienfresser, während Lionotus fasciola und Podophrya fixa räuberisch von den Bakterienfressern leben.

Als gelegentliche Bewohner des Schlammes konnten die Ciliaten Didinium nasutum, Trachelophyllum pusillum, Chilodonella cucullata, Chilodonella uncinata, Cinetochilium margaretaceum, Trochilia minuta, Uronema marinum, Stylonychia mytilus, die Flagellaten Oicomonas termo und Anthophysa vegetans, die Amoebe Cochliopodium pellucidum sowie die Rädertiere Rotaria vulgaris und Eosphora najas gefunden werden. Sie waren teils in geringer Zahl, teils in auffallend hoher Zahl vorhanden. An Algen zeigte sich mitunter Chroococcus minutus in Mengen bis zu 16000/cm<sup>3</sup>. Von mikroskopisch erfaßbaren Bakterien waren stets Sphaerotilus natans, hin und wieder Spirillum undulans an den Flocken anzutreffen. Höhere Tiere, und zwar Nematoden der Gattung Diplogaster, vervollständigten das Faunenbild.

**Tabelle 11**  
Vergleich der Keimzahlen (Mittelwerte in Mio/cm<sup>3</sup>)

|                        | März | April | Mai  | Durchschnitt |
|------------------------|------|-------|------|--------------|
| Becken 1 (20 mg/l Fe)  | 1,08 | 1,44  | 1,41 | 1,31         |
| Becken 2 (10 mg/l Al)  | 0,97 | 1,43  | 1,26 | 1,22         |
| Becken 3 (40 mg/l Fe)  | 1,14 | 1,69  | 1,12 | 1,32         |
| Becken 4 (ohne Zusatz) | 0,62 | 0,95  | 0,83 | 0,80         |

Die Mehrzahl der angeführten Organismen gehören nach dem Saprobien-system (LIEBMANN 1951) der  $\alpha$ -mesosaprobe Zone an, nämlich: *Opercularia coarctata*, *Vorticella convallaria*, *Paramaecium caudatum*, *Chilodonella uncinata*, *Chilodonella cucullata*, *Lionotus fasciola*, *Uronema marinum*, *Podophrya fixa* und *Anthophysa vegetans*. Für schwach belasteten Belebtschlamm sind die  $\beta$ -mesosaprobe Ciliaten *Aspidisca costata* und *Euplotes charon* typisch.

Über das Auftreten von polysaprobe Organismen im belebten Schlamm wird unten berichtet.

In der qualitativen Zusammensetzung der Biozönose wiesen Becken 1—4 keine Unterschiede auf. Es fanden sich im Eisenbelebtschlamm bzw. Aluminiumbelebtschlamm dieselben Formen wie im normalen Schlamm. In quantitativer Hinsicht ergaben sich mitunter erhebliche Differenzen. Am individuenärmsten war Becken 3, das im Zulauf 40—60 mg/l Eisen erhielt. Die Becken 1 (20 mg/l Eisenzusatz) und 2 (10 mg/l Aluminiumzusatz) ähnelten sich in der zahlenmäßigen Ausbildung der Lebensgemeinschaft, die Zahl der gefundenen Organismen blieb aber weit hinter der des Beckens 4 (ohne Zusatz) zurück. Tabelle 10 zeigt die Verteilung der einzelnen Arten der vier Belebungsbecken im Durchschnitt der Versuchsperiode Februar/Juni bis 1953. Fast alle Protozoenarten wurden im Becken 4 häufiger angetroffen als bei dem Verfahren mit Eisen- bzw. Aluminiumzusatz. Lediglich bei *Paramaecium caudatum* und *Podophrya fixa* ergaben sich hinsichtlich der Individuenzahlen keine Unterschiede. Sie wurden in allen Becken etwa in derselben Menge gefunden. Charakteristisch für eisenhaltiges Wasser ist das stärkere Auftreten des Flagellaten *Anthophysa vegetans*. Da aber im Belebtschlamm von Becken 3 fast nur Einzeltiere der Flagellatenkolonie, aber kaum typische Kolonien anzutreffen waren, ist anzu-

**Tabelle 12**

Mittelwert der Keimzahlen bezogen auf den Mittelwert des 4. Beckens (100% = 0,64 Mio/cm<sup>3</sup>)

|                        |      |
|------------------------|------|
| Becken 1 (20 mg/l Fe)  | 160% |
| Becken 2 (10 mg/l Al)  | 152% |
| Becken 3 (40 mg/l Fe)  | 165% |
| Becken 4 (ohne Zusatz) | 100% |

nehmen, daß ein Eisengehalt von über 40 mg/l auf die Koloniebildung hemmend wirkt.

Umgekehrt wie die Protozoenzahlen in den Becken 1—4 verhielten sich die Keimzahlen. Diese waren in den mit Eisen- und Aluminiumzusatz betriebenen Anlagen wesentlich höher als im normalen Belebtschlamm. In Tabelle 11 sind die Keimzahlen für die einzelnen Becken angeführt.

Vergleicht man die Keimzahlen der verschiedenen Becken miteinander, so stellt man fest, daß sie im Becken 1—3 mitunter fast doppelt so hoch liegen wie im Becken 4. Setzt man den Mittelwert der Keimzahlen des 4. Beckens gleich 100%, dann erhält man die in Tabelle 12 zusammengetragenen Werte.

Der normale Belebtschlamm weicht also von den mit Eisenzusatz bzw. Aluminiumzusatz betriebenen Anlagen hinsichtlich der Keimzahlen erheblich ab. Die stärkere Bakterienentwicklung dürfte einerseits auf die durch die Eisenflocken geschaffene vergrößerte Oberfläche zurückzuführen sein, andererseits auf die das Bakterienwachstum fördernde physiologische Wirkung des Eisens überhaupt, da auch geringer Eisenzusatz, der nicht zu einer Ausflockung von Hydroxyd führt, die Keimzahlen erhöht.



Abb. 18. Die Keimzahlen des Anlagenabflusses zeigen eine Korrelation zu den Keimzahlen des Belebungsbeckens und des Anlagenzuflusses,  $n$  = Keimzahlen in Mio/cm<sup>3</sup>.

Ähnliche Beobachtungen wurden auch von anderen Autoren, wie bereits in der Literaturübersicht ausgeführt, gemacht.

Eine eindeutige Beziehung zwischen Keimzahlen und Protozoenzahlen ergab sich bei den meisten Untersuchungen nicht. Lediglich bei zwei Versuchen zeigte sich, daß eine starke Protozoenentwicklung auf eine starke Bakterienentwicklung folgte. Zwischen den Keimzahlen des Belebungsbeckens und den Keimzahlen des Anlagenabflusses konnte eine direkte Beziehung beobachtet werden. Auch die Keimzahlen des Anlagenabflusses wiesen noch einen Zusammenhang mit denen des Rohabwassers auf. Maxima im Zulauf ergaben Maxima im Belebungsbecken und ebenso im Anlagenabfluß. Dasselbe gilt für die Minima. Diese Ergebnisse, die in Abb. 18 graphisch dargestellt sind, wurden bei allen Versuchen bestätigt.

Bei schwacher Belastung der Anlagen konnte im Belebtschlamm eine intensive Nitrifikation verzeichnet werden. Mit dem Einsetzen derselben wies der

Ciliat *Aspidisca costata* eine starke Vermehrungstendenz auf. Er trat dabei mit solcher Regelmäßigkeit und Häufigkeit auf, daß man geradezu von einem *Aspidisca*-Stadium des Belebtschlammes sprechen kann. Bei der Massenentwicklung des Ciliaten wurden wiederholt Formen gefunden, die zwar die Merkmale der Art *Aspidisca costata* aufwiesen, aber infolge ihrer eigenartigen Rippenbildung doch erheblich davon abwichen (SCHERB 1957). *S. Kollago*

Mit den hohen Ciliatenzahlen bei der Nitrifikation ging eine Zunahme der Durchsichtigkeit des Anlagenabflusses Hand in Hand. Auch bei Versuchen, die

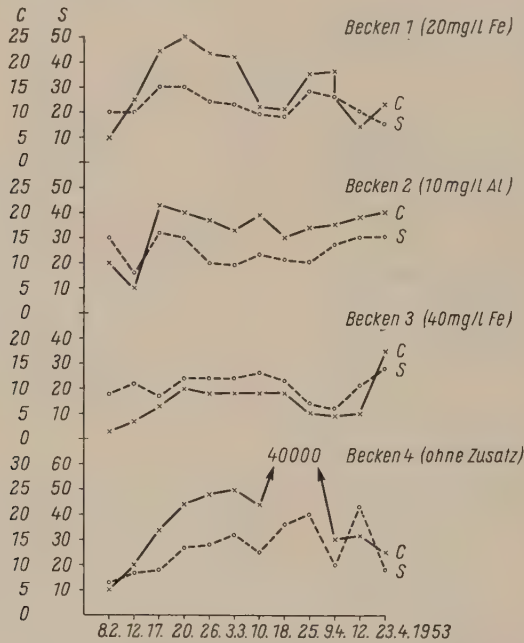


Abb. 19. Abhängigkeit der Durchsichtigkeit des gereinigten Abwassers von der Ciliatenzahl.  
C = Ciliatenzahl (1000/cm³) S = Durchsichtigkeit (cm).

nicht zur Nitrifikation führten, wurde in dem Maße, wie sich die Ciliaten vermehrten, das Wasser klarer. Die Bedeutung der Protozoen für die Klarheit und Durchsichtigkeit des gereinigten Wassers, wie sie VIEHL (1937), SUGDEN und LOYD (1950) betonen, ließ sich in mehreren Versuchen bestätigen. In Abb. 19 sind für die Becken 1—4 die Ciliatenzahlen in Beziehung zur Durchsichtigkeit des Anlagenabflusses aufgetragen. In den dargestellten Diagrammen kommt deutlich zum Ausdruck, daß zwischen Ciliatenzahlen und Durchsichtigkeit ein ursächlicher Zusammenhang besteht. Die Durchsichtigkeit des gereinigten Abwassers erreichte in Anlage 4 (ohne Zusatz) wesentlich höhere Werte als in den Becken 1—3 (Eisen- bzw. Aluminiumzusatz). Dieses Ergebnis kann nur

auf die höheren Protozoenzahlen des normalen Belebtschlammes gegenüber Belebtschlamm mit Eisenzusatz zurückgeführt werden.

Das Auftreten des Ciliaten *Paramaecium caudatum* war bei vielen Versuchen von einer verstärkten Entwicklung des Sauginfusers *Podophrya fixa* begleitet. Dies bestätigt die bereits von anderer Seite gemachte Feststellung, daß *Podophrya fixa* vorwiegend von *Paramaecium* lebt.

Die Schlammkonzentration wurde bei den meisten Versuchen zwischen 3000 und 6000 mg/l gehalten, wobei der Sauerstoffgehalt im Belüftungsbecken stets über 2 mg/l betrug. Es war daher im Schlamm eine reiche Protozoenfauna entwickelt.

In qualitativer Hinsicht änderte sich die Lebensgemeinschaft bei Erhöhung der Schlammkonzentration praktisch nicht. Abweichungen im Faunenbild ließen sich nur in quantitativer Hinsicht vermerken. Während die Gesamtprotozoenzahlen bei Erhöhung der Schlammkonzentration keine deutliche Zunahme

Tabelle 13

Schlammkonzentrationen und Ciliatenzahlen (Mittelwerte)

| Becken          | 3000 mg/l | 4000 mg/l | 5000 mg/l |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 (20 mg/l Fe)  | 11 800    | 15 500    | 19 400    |
| 2 (10 mg/l Al)  | 10 200    | 14 000    | 17 000    |
| 3 (40 mg/l Fe)  | 4900      | 6500      | 8100      |
| 4 (ohne Zusatz) | 19 100    | 26 000    | 50 000    |

ergaben, wiesen dagegen die Ciliaten eine merkliche Zunahme auf. Zwischen Schlammkonzentration und der Ciliatenzahl konnte eine recht gute Korrelation beobachtet werden. Beim normalen Verfahren nahmen dabei die Ciliaten schneller zu als bei dem mit Eisenzusatz bzw. Aluminiumzusatz betriebenen Verfahren, was der oben bereits besprochenen Erfahrung entspricht. In Tab. 13 sind die den verschiedenen Schlammkonzentrationen entsprechenden Ciliatenzahlen enthalten.

Es zeigt sich, daß die Ciliatenzahlen des am stärksten mit Eisen versetzten Beckens 3 ganz erheblich hinter Becken 1 und 2, vor allem aber Becken 4 (ohne Zusatz) zurückbleiben. Da die Ciliaten des Belebtschlammes im wesentlichen Bakterienfresser sind, wäre anzunehmen, daß sie sich im Becken 3 (40 mg/l Fe) infolge der höheren Bakterienzahlen stärker entwickeln. Da dies nicht der Fall ist, dürfte, wie schon früher ausgeführt, eine hemmende Wirkung des Eisens für die Entwicklung der Ciliaten die Ursache sein.

Bei einer Schlammkonzentration von 3000—6000 mg/l wurde die Belastung von 4 l/l/Tag auf 16 l/l/Tag gesteigert, wobei der Schlamm gesund blieb und in keiner Anlage die geringste Blähschlamm Bildung festzustellen war. Auch bei stärkerer Belastung traten dieselben Leitorganismen wie bei geringer Belastung

als vorherrschende Species auf, nämlich die Ciliaten *Opercularia coarctata*, *Vorticella convallaria* und *Aspidisca costata*.

In weiteren Untersuchungen sollte die Belastbarkeit des Verfahrens bei geringer Schlammkonzentration, nämlich bei 2000 mg/l, näher studiert werden. Die Schlammmenge im Belebungsbecken wurde ziemlich konstant auf dieser Höhe gehalten und die Belastung allmählich gesteigert.

Für die Versuche standen zwei kleine Becken zur Verfügung, die ohne Eisenzusatz betrieben wurden.

Bei der schwachen Belastung von 5 l/l/Tag wies der belebte Schlamm eine günstige Beschaffenheit auf. Die Fadenbakterie *Sphaerotilus natans* wurde in dem lockeren Schlamm nur mit wenigen Fäden angetroffen; ziemlich zahlreich waren die Leitformen der früheren Versuche, nämlich *Aspidisca costata*, *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria*. Flagellaten und Amöben waren praktisch überhaupt nicht anzutreffen. Die Durchsichtigkeit nach der SNELLschen Schriftprobe betrug etwa 35 cm.

Nach Steigerung der Belastung auf 6,5—8 l/l/Tag verwandelte sich der Schlamm, der bis dahin feinflockig war und im Absetzglas eine klare Wassersäule hinterließ, nach kurzer Zeit in typischen »Blähschlamm«. Der belebte Schlamm war durch fest in Bündeln zusammenhängende *Sphaerotilus*fäden charakterisiert und zeigte in keiner Weise mehr die flockige Struktur der Vortage. In der Lebensgemeinschaft herrschten zunächst noch die Ciliaten *Aspidisca costata* und *Opercularia coarctata* vor, doch nahm ihre Zahl stark ab. Vor allem *Opercularia coarctata* verschwand schließlich ganz. Vereinzelt entwickelten sich kleine Flagellaten, wie z. B. *Bodo putrinus* und die Amöbe *Amoeba limax*, Protozoen, die vorher überhaupt nicht vorhanden waren. Auch Spirillen wies der Schlamm in zunehmender Menge auf. Insgesamt war der Schlamm durch Arten- als auch Individuenarmut, besonders bei den Ciliaten, ausgezeichnet.

Ein typischer Blähschlamm ist also durch starkes Überhandnehmen von *Sphaerotilus natans* charakterisiert, dem eine Abnahme der Ciliaten *Aspidisca costata*, *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria* parallel geht. Flagellaten und Amöben pflegen sich dagegen stärker zu entwickeln, ebenso zeigen Spirillen eine deutliche Zunahme. Die Gesamtzahl an Protozoen, besonders Ciliaten, ist im Blähschlamm auffallend gering. Die Abb. 20 und 21 zeigen typischen Blähschlamm, wie man ihn bei mikroskopischer Kontrolle findet.

Die Versuche wurden öfters wiederholt. Manchmal konnte bei Blähschlamm-bildung ein verstärktes Auftreten von *Glaucoma scintillans* und *Glaucoma pyriformis* festgestellt werden. Sonst ergaben sich keine neuen Gesichtspunkte.

Durch Eisenzusatz und Zurücknahme der Belastung konnte die Blähschlamm-bildung rasch zurückgedrängt werden, so daß der Schlamm im Nachklärbecken wieder absetzte. Der Belebtschlamm erholte sich und die Lebensgemeinschaft zeigte bald eine Verbesserung durch besonders schöne Ausbildung sehr vieler Kolonien von *Vorticella convallaria*.

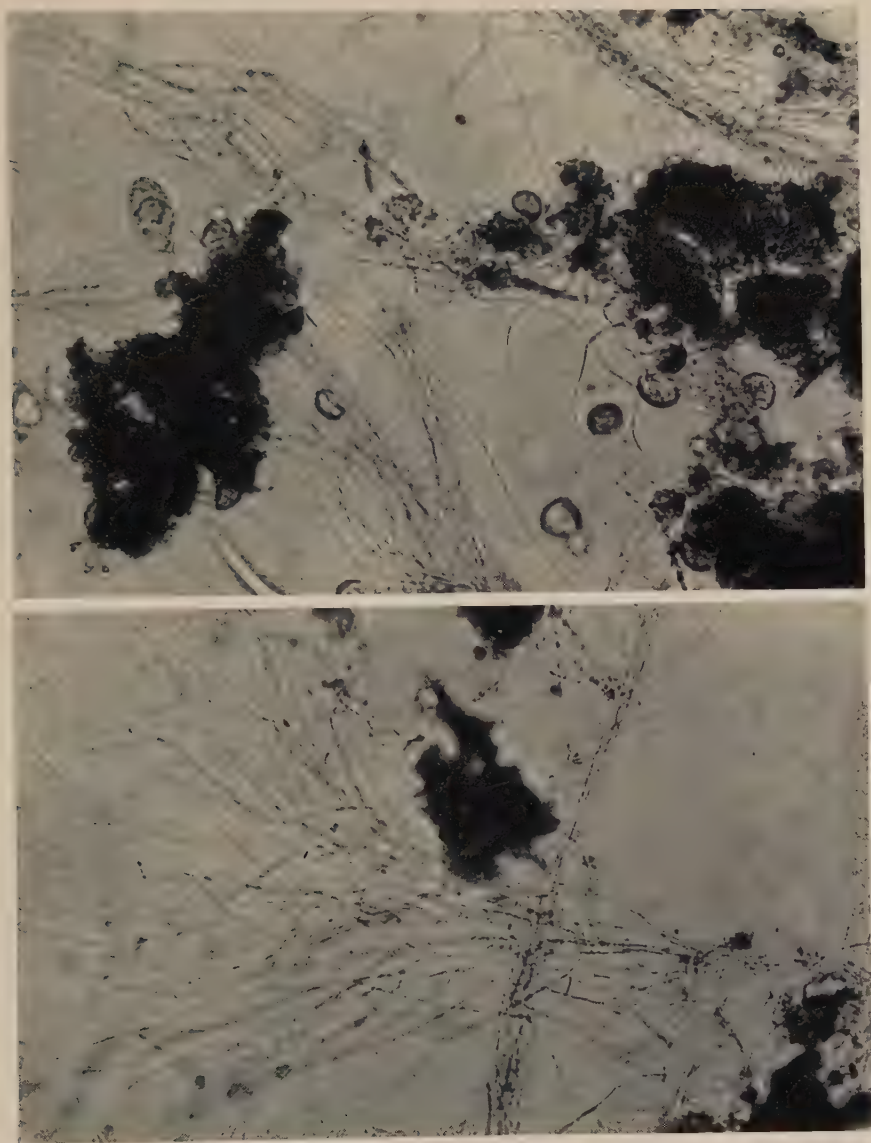


Abb. 20 und 21. Starkes Überhandnehmen von *Sphaerotilus natans*. Blähschlamm.  
Vergrößerung 350fach.

Nach einigen Tagen wurde die Belastung erneut gesteigert, und zwar diesmal von 5 l/l/Tag auf 10 l/l/Tag und schließlich auf etwa 15 l/l/Tag, wobei die Schlammkonzentration wie vorher auf etwa 2000 mg/l gehalten wurde. Es trat dabei nicht die geringste Blähschlammbildung auf. Das biologische Bild

des Schlammes blieb etwa so, wie an den vorausgegangenen Tagen. Die Schlammflocken wiesen eine grobflockigere Struktur gegenüber der relativ feinflockigen der schwachen Belastung auf, doch setzten sie im Standglas nach 15 Minuten rasch auf  $\frac{1}{3}$  des Volumens ab.

Bei weiterer Steigerung der Belastung auf etwa 18 l/l/Tag traten im Belebtschlamm freischwimmende Ciliaten wie *Oxytricha pellionella*, *Lionotus fasciola*, vor allem aber *Paramecium caudatum* auffallend stärker in den Vordergrund, von denen etwa 500 bis 1000 Individuen gegenüber 100 bis 200 der Tage zuvor im Kubikzentimeter gezählt wurden. Manchmal waren vereinzelt *Chilodonella cucullata*, *Glaucoma scintillans*, *Glaucoma pyriformis* und *Bodo saltans*, Formen, die bei geringer Belastung kaum gefunden wurden, an den Flocken anzutreffen. Wenn sich auch nach einer Belastung von 18 l/l/Tag bereits Vertreter der polysaprophytischen Zone entwickelten, so blieb das Gesamtbild der Biozönose dennoch deutlich  $\alpha$ -mesosaprophytisch. Die Schwerpunkte im Auftreten der Protozoen lagen nach wie vor bei *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria*.

Erst bei einer Belastung von etwa 22 l/l/Tag barg der Schlamm mehr polysaprophytische Organismen. *Colpidium colpoda*, *Glaucoma scintillans*, *Glaucoma pyriformis* zusammen mit dem Flagellaten *Polytoma uvella* und der Amöbe *Amoeba limax* traten in zunehmender Menge auf, dabei gingen *Vorticella convallaria*, *Opercularia coarctata*, besonders aber *Aspidisca costata* stark zurück. Insgesamt war die Ciliatenfauna individuenärmer als bei geringer Belastung.

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die biologische Zusammensetzung des Schlammes unter den verschiedenen Bedingungen und dessen Reinigungseffekt.

Bei der Schlammkonzentration von 2000 mg/l war der Reinigungseffekt nicht so hoch wie bei der hohen Schlammkonzentration (3000—6000 mg/l) der früheren Versuche. Der Reinigungseffekt betrug bei der Belastung von 10—20 l/l/Tag im Durchschnitt 69—72 %.

Es zeigte sich also, daß beim Schlammbelebungsverfahren bei geringer Schlammkonzentration der Betrieb der Anlagen bei mittlerer Belastung schwierig ist, eine Beobachtung, die in der Praxis nur beim Tropfkörperverfahren bekannt war. Wie weit sich mittlere Belastung bei hoher Schlammkonzentration auswirkt, bedarf noch weiterer Versuche.

Zusammenfassend ergibt sich aus den Versuchen mit städtischem Abwasser:

1. In den ersten Tagen der Einarbeitung des Belebtschlammes zeigt die Lebensgemeinschaft ein vorwiegend polysaprophytisches Gepräge. Die im Belebtschlamm zuerst auftretenden Organismen sind neben den Bakterien besonders Flagellaten und Amöben. Ciliaten sind zunächst in geringerer Zahl vorhanden, im Laufe der Einarbeitung aber in Zunahme begriffen. Durch Eisenzusatz zum Rohabwasser wird die Einarbeitung des Schlammes beschleunigt; die für den Reinigungseffekt wichtige Schlammkonzentration wird schneller erreicht als beim normalen Verfahren.

**Tabelle 14**  
Biologie des Belebtschlammes bei wechselnder Belastung

| Datum                                              |         | 10. 6. | 11. 6. | 12. 6. | 14. 6. | 15. 6. | 17. 6. | 25. 6. |
|----------------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch                       | Zulauf  | 138    | 110    | 134    | 112    | 151    | 156    | 148    |
|                                                    | mg/l    |        |        |        |        |        |        |        |
|                                                    | Ablauf  | 34     | 15     | 36     | 30     | 45     | 49     | 34     |
|                                                    | Abbau % | 76     | 85     | 73     | 72     | 70     | 68     | 77     |
| Belastung                                          | l/l/Tag | 4      | 4,5    | 6      | 6,2    | 6,4    | 7,6    | 4,0    |
| Schlammbeschaffenheit                              |         | f.     | f.     | f.     | Bl.    | Bl.    | g.     | g.     |
| <i>Zoogloea ramigera</i>                           |         | —      | —      | v      | h      | h      | v      | v      |
| <i>Spirillum undulans</i>                          |         | —      | —      | h      | h      | h      | h      | h      |
| <i>Sphaerotilus natans</i>                         |         | h      | h      | h      | m      | m      | m      | sh     |
| <i>Chroococcus minutus</i>                         |         | 3000   | 5200   | 200.   | 1500   | —      | 200    | —      |
| <i>Amoeba limax</i>                                |         | —      | —      | —      | 80     | 460    | 80     | 20     |
| <i>Cochliopodium pellucidum</i>                    |         | 40     | 40     | —      | —      | 60     | —      | —      |
| <i>Bodo putrinus</i>                               |         | —      | —      | —      | 600    | 40     | 60     | —      |
| <i>Bodo saltans</i>                                |         | —      | —      | 40     | 60     | —      | 80     | —      |
| <i>Lionotus fasciola</i>                           |         | 20     | 40     | 20     | —      | —      | 40     | 20     |
| <i>Trochilia minuta</i>                            |         | 20     | 160    | —      | —      | —      | —      | —      |
| <i>Paramaecium caudatum</i>                        |         | 100    | 140    | 120    | 40     | 80     | 40     | 4200   |
| <i>Oxytricha pellionella</i>                       |         | 80     | 60     | 80     | —      | —      | —      | 140    |
| <i>Euplotes charon</i>                             |         | 40     | 20     | 20     | —      | —      | —      | —      |
| <i>Aspidisca costata</i>                           |         | 6180   | 4200   | 1800   | 1240   | —      | —      | 20     |
| <i>Opercularia coarctata</i>                       |         | 2040   | 3100   | 2280   | —      | —      | —      | —      |
| <i>Vorticella convallaria</i>                      |         | 4300   | 4220   | 1980   | 1920   | 240    | 80     | 1100   |
| <i>Podophrya fixa</i>                              |         | 20     | 40     | 20     | —      | —      | —      | 40     |
| <i>Rotaria vulgaris</i>                            |         | 60     | 80     | 160    | 420    | 160    | 100    | 700    |
| <i>Diplogaster spec.</i>                           |         | 40     | 160    | 20     | —      | —      | —      | 80     |
| Zahl der Protozoenarten                            |         | 9      | 9      | 8      | 6      | 5      | 6      | 6      |
| Zahl der Ciliatenarten                             |         | 8      | 8      | 7      | 3      | 2      | 3      | 5      |
| polysaprobe Protozoenarten                         |         | —      | —      | —      | 2      | 2      | 2      | 1      |
| $\alpha$ -mesosaprobe                              | „       | 4      | 4      | 5      | 3      | 2      | 4      | 3      |
| $\beta$ -mesosaprobe                               | „       | 2      | 2      | 2      | 1      | —      | —      | 1      |
| g = grobflockig, f = feinflockig, Bl = Blähschlamm |         |        |        |        |        |        |        |        |

- Der eingearbeitete Belebtschlamm beherbergt eine  $\alpha$ - bis  $\beta$ -mesosaprobe Lebensgemeinschaft, die neben Bakterienzoogloeen vorwiegend aus wenigen Ciliatenarten besteht, bei denen *Opercularia coarctata*, *Vorticella convallaria* und *Aspidisca costata* vorherrschen.
- In der qualitativen Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft weisen Eisenbelebtschlamm und Belebtschlamm ohne Zusatz keine Unterschiede

Tabelle 14 (Fortsetzung)

| Datum                                | 30.6. | 2.7. | 3.7. | 4.7. | 8.7. | 9.7. | 11.7. | 15.7. |
|--------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| KMnO <sub>4</sub> -Zulauf            | 149   | 150  | 85   | 161  | 170  | 159  | 162   | 171   |
| Verbrauch mg/l Ablauf                | 24    | 39   | 18   | 45   | 48   | 47   | 55    | 61    |
| Abbau%                               | 83    | 74   | 79   | 72   | 72   | 70   | 66    | 65    |
| Belastung l/l/Tag                    | 5     | 9    | 12   | 15   | 20   | 24   | 25    | 25    |
| Schlammbeschaffenheit                | f.    | g    | g    | g    | g    | g    | g     | g     |
| Zoogloea ramigera                    | v     | v    | —    | v    | v    | v    | v     | v     |
| Spirillum undulans                   | v     | —    | —    | v    | v    | v    | h     | h     |
| Sphaerotilus natans                  | v     | h    | h    | h    | sh   | sh   | sh    | sh    |
| Chroococcus minutus                  | 5000  | —    | 16   | 1000 | —    | —    | 1500  | 200   |
| Amoeba limax                         | —     | —    | —    | —    | —    | —    | 1600  | 1700  |
| Amoeba guttula                       | —     | —    | —    | 100  | —    | —    | 20    | 120   |
| Cochliopodium pellucidum             | —     | 20   | —    | —    | —    | —    | —     | —     |
| Bodo putrinus                        | —     | —    | —    | —    | —    | —    | —     | 1000  |
| Bodo saltans                         | —     | —    | —    | —    | 240  | —    | 260   | 500   |
| Polytoma uvella                      | —     | —    | —    | —    | 100  | —    | 100   | 620   |
| Trachelophyllum pusillum             | 800   | 300  | 260  | 420  | 40   | 60   | 40    | —     |
| Lionotus fasciola                    | 120   | 120  | 40   | 20   | —    | 200  | 240   | 300   |
| Paramaecium caudatum                 | 160   | 380  | 120  | 100  | 810  | 720  | 1860  | 820   |
| Colpidium colpoda                    | —     | —    | —    | —    | 100  | 240  | 200   | 220   |
| Glaucoma scintillans                 | —     | —    | —    | —    | 240  | 160  | 240   | 370   |
| Glaucoma pyriformis                  | —     | —    | —    | —    | 20   | 20   | 40    | 90    |
| Chilodonella cucullata               | —     | —    | —    | —    | 100  | 260  | 240   | 310   |
| Oxytricha pellionella                | 210   | 14   | 80   | 420  | 520  | 440  | 600   | 400   |
| Stylonychia mytilus                  | 20    | 40   | —    | —    | —    | —    | —     | 20    |
| Euplotes charon                      | 20    | 10   | —    | —    | —    | —    | —     | —     |
| Aspidisca costata                    | 360   | 1800 | 1480 | 2300 | 80   | —    | —     | —     |
| Opercularia coarctata                | 40    | 1250 | 3220 | 840  | 1200 | 1800 | 780   | 20    |
| Vorticella convallaria               | 3240  | 2420 | 3570 | 3670 | 6110 | 3200 | 4820  | 970   |
| Podophrya fixa                       | 40    | 40   | 20   | 20   | 60   | 80   | 20    | 20    |
| Rotaria vulgaris                     | 100   | 180  | 20   | 20   | 60   | 80   | 20    | 20    |
| Diplogaster spec.                    | 120   | 160  | 20   | —    | —    | —    | —     | —     |
| polysaprobe Protozoenarten           | —     | —    | —    | —    | 4    | 3    | 5     | 6     |
| $\alpha$ -mesosaprobe Protozoenarten | 4     | 4    | 4    | 4    | 5    | 5    | 6     | 6     |
| $\beta$ -mesosaprobe Protozoenarten  | 2     | 2    | 1    | 1    | 1    | —    | —     | —     |

auf, dagegen sind in quantitativer Hinsicht deutliche Unterschiede zu vermerken. Die Protozoen werden durch Eisenzusatz in ihrer Entwicklung merklich eingeschränkt, während die Wasserbakterien durch Eisenzusatz gefördert werden.

4. Bei geringer Schlammkonzentration (bis 2000 mg/l) tritt bei mittlerer Belastung (6—8 l/l/Tag) Blähschlamm auf. Dieser ist durch starkes Überhandnehmen von *Sphaerotilus natans* charakterisiert. Die Zahl der Protozoen, besonders der Ciliaten, ist im Blähschlamm sehr gering.
5. Bei hoher Schlammkonzentration (über 3000 mg/l) kann die Belastbarkeit des Verfahrens höher gesteigert werden, ohne daß Blähschlamm auftritt. Auch bei starker Belastung treten die Hauptformen der geringen Belastung, nämlich *Opercularia coarctata*, *Vorticella convallaria* und *Aspidisca costata*, als vorherrschende Species auf.
6. Bei Steigerung der Belastung über 20 l/l/Tag treten polysaprobe Organismen in zunehmender Zahl auf. Der Schlamm beherbergt neben vielen Spirillen mehrere Arten von poly- und  $\alpha$ -mesosaprobe Flagellaten und Amöben;  $\alpha$ -mesosaprobe Ciliaten, besonders aber  $\beta$ -mesosaprobe Ciliaten, sind in Abnahme begriffen.
7. Mit einer Erhöhung der Schlammkonzentration geht eine Zunahme der Ciliaten Hand in Hand.
8. Der Ciliat *Aspidisca costata* zeigt mit dem Einsetzen der Nitrifikation eine starke Vermehrungstendenz. Das Auftreten von *Paramaecium caudatum* ist von einer verstärkten Entwicklung des Sauginfusers *Podophrya fixa* begleitet.
9. Die Keimzahlen im Belebtschlamm sind von den Keimzahlen des Zulaufs abhängig. Auch die Keimzahlen des gereinigten Abwassers zeigen noch eine Beziehung zu denen des Zulaufs.
10. Zwischen Ciliatenzahlen und Durchsichtigkeit des gereinigten Abwassers besteht ein ursächlicher Zusammenhang. Nimmt die Zahl der Ciliaten im Belebtschlamm zu, so steigt die Durchsichtigkeit des Anlagenabflusses.

Versuche bei der Reinigung von Molkereiabwasser mit dem Schlammbelebungsverfahren wurden von verschiedenen Seiten durchgeführt (KESSENER und RUDOLFS 1934, NOLTE 1948, KEE 1950, HORTON und TREBLER 1953 u.a.), wobei sich zeigte, daß dieses Verfahren zur Behandlung von Molkereiabwasser herangezogen werden kann. Allen diesen Untersuchungen liegen jedoch nur chemische Daten zugrunde. Über die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft findet man nur bei BARITT (1940) kurze Angaben, die sich vorwiegend auf Feststellungen der Gattungen beschränken.

Es war daher von Interesse festzustellen, wie die Lebensgemeinschaft der belebten Flocke aus Molkereiabwasser unter verschiedenen Bedingungen zusammengesetzt ist. Die Versuche wurden mit geeisentem und ungeeisentem Molkereiabwasser durchgeführt.

Das Abwasser für die Versuche wurde künstlich bereitet, indem 2,5 cm<sup>3</sup> bzw. 5 cm<sup>3</sup> Vollmilch mit 1 Liter Leitungswasser vermischt wurden, so daß das Abwasser einen Permanganatverbrauch von 400 bzw. 800 mg/l aufwies.

Es wurden bei den Versuchen die gleichen Belüftungsbecken wie bei der Reinigung von städtischem Abwasser verwendet, und zwar:

2 Rundbecken zu je 3,8 l und 1 Rechteckbecken zu 10 l, die gleichzeitig betrieben wurden, wobei

Becken 1 (3,8 l) Molkereiabwasser ohne Eisenzusatz,

Becken 2 (3,8 l) und Becken 3 (10 l) Molkereiabwasser mit Eisenzusatz erhielten.

*Becken 1* wurde zunächst mit Molkereiabwasser beschickt, das einen Kaliumpermanganatverbrauch von etwa 800 mg/l aufwies. Nach etwa 3 Wochen Versuchsdauer war der Schlamm durch Sphaerotilusfäden stark verfilzt und setzte sich nur sehr schwer ab. Es wurde daher die Abwasserkonzentration auf die Hälfte herabgesetzt. Da das Abwasser einen sehr geringen Gehalt an Ammoniak-Stickstoff hatte (0,5—1,0 mg/l), wurde der Versuch gemacht, durch Zugabe von 20 mg/l  $\text{NH}_3$  zum Abwasser den Stickstoff- wie auch den  $p_{\text{H}}$ -Wert zu erhöhen.

*Becken 2* erhielt Molkereiabwasser mit einem Kaliumpermanganatverbrauch von 800 mg/l, dem im Laufe der Untersuchungen 20 mg/l, 40 mg/l und 80 mg/l Eisen zugesetzt wurden. Um die bei direkter Beschickung des Belebungsbeckens mit geeisentem Abwasser auftretende erhebliche Verpilzung zu verhindern, wurde das Abwasser eine Zeitlang einem Vorbelüftungsbecken zugeführt. Später wurde das Vorbecken wieder entfernt, um die Reaktion von Sphaerotilus natans auf stark geeisentes Abwasser (80 mg/l) näher zu untersuchen. Veranlaßt durch die günstige Wirkung von Ammoniak auf die Schlammbiozönose bei Versuch 1 sollte auch hier 20 mg/l  $\text{NH}_3$  dem Abwasser zugegeben werden.

*Becken 3* erhielt Abwasser mit einem Kaliumpermanganatverbrauch von 800 mg/l. Dazu wurde Frischwasser von etwa  $\frac{1}{10}$  der Abwassermenge in einem Becherglas 15 Minuten lang geeisent und kontinuierlich in das Belebungsbecken geleitet, in dem es mit dem Molkereiabwasser gemischt wurde. Der Eisengehalt der Mischung betrug etwa 40 mg/l.

#### Belebtschlammverfahren ohne Eisenzusatz: *Becken 1*

Während der Einarbeitung des Schlammes, die etwa 14 Tage in Anspruch nahm, stellten sich die gleichen Organismen ein, wie bei den Versuchen mit städtischem Abwasser. Flagellaten und Amöben, aber auch Ciliaten entwickelten sich in großer Zahl. Die Lebensgemeinschaft zeigte ein polysaprobies Gepräge. Auffallend für diese Lebensgemeinschaft war, daß die Fadenbakterie Sphaerotilus natans schon in den ersten Tagen in verhältnismäßig starker Entwicklung auftrat. Der Schlamm verlor dadurch seine flockige Beschaffenheit.

Nach der Einarbeitung bestand der belebte Schlamm fast nur noch aus Sphaerotilus natans, wobei die Sphaerotilusfäden in dicken Bündeln zusammenhängen. Der weißlich-graue Schlamm enthielt neben vielen Spirillen eine große Zahl an poly- und  $\alpha$ -mesosaprobien Flagellaten und Amöben. Bei den Flagellaten waren Trichomonas compressa und Anthophysa vegetans, bei den

Amoeben *Amoeba limax* und *Amoeba guttula* besonders stark entwickelt. Die Ciliaten traten in mehreren Arten auf, erreichten aber insgesamt bei weitem nicht die Individuenzahlen des normalen städtischen Belebtschlammes, da fest-sitzende Formen, die dort meist in großen Mengen gefunden wurden, in dem stark verfilzten Schlamm nur in geringer Häufigkeit lebten (Tab. 15: 21.9). Wesentlich höhere Arten- und Individuenzahlen als im städtischem Belebtschlamm zeigten bei den Ciliaten freischwimmende Formen, z. B. *Paramecium caudatum* und *Trochilia minuta*. In einen Standzylinder gebracht, setzte sich der Schlamm auch nach längerer Zeit kaum ab, wobei das überstehende Wasser durch Kolloide stark getrübt war. Der Reinigungseffekt, gemessen am Kaliumpermanganatverbrauch, betrug bei einer Raumbelastung von 3 l/Tag etwa 70%.

Es wurde nun die Konzentration des Abwassers, die vorher 800 mg/l betrug, auf die Hälfte herabgesetzt. Zunächst konnte dadurch keine wesentliche Besserung der Schlammbeschaffenheit erreicht werden. Das biologische Bild des Schlammes zeigte eine ähnliche Zusammensetzung wie in den vorhergehenden Tagen. Schließlich ging die Zahl der Flagellaten langsam zurück und die Amoeben verschwanden ganz (Tab. 15: 9.10.; 16.10.). Der Reinigungseffekt wurde erheblich besser und stieg auf 80 bis 85 %. Versuchsweise erhielt das Abwasser eine Woche lang einen Zusatz an Kalkwasser. Diese Maßnahme hatte jedoch keine Besserung der Schlammbeschaffenheit zur Folge. Der Schlamm wurde etwas sperriger und setzte eher noch schlechter ab als vorher.

Da das Molkereiabwasser einen sehr niedrigen Gehalt an Ammoniak-Stickstoff aufwies, wurde es eine Zeitlang mit 20 mg/l Ammoniak versetzt, so daß der Ammoniak-Stickstoff des Abwassers auf 16—18 mg/l und der  $p_H$ -Wert auf 7,6—7,7 erhöht wurde. Die Schlammbeschaffenheit änderte sich daraufhin wesentlich. Es trat eine Auflockerung des Schlammes ein; die verklumpten Sphaerotilusbündel zerteilten sich. In einen Standzylinder gebracht, setzte der Schlamm rasch auf  $\frac{1}{3}$  seines Volumens ab; das überstehende Wasser war dabei kaum getrübt. An den Schlammflocken saßen dicht wie Perlenketten Kolonien von *Vorticella convallaria*, zusammen mit *Opercularia coarctata* und *Podophrya fixa*. Der  $\beta$ -mesosaprobe Ciliat *Didinium nasutum*, der bis dahin nur bei gutem Reinigungseffekt der Anlagen im städtischem Belebtschlamm gefunden wurde und wie *Podophrya fixa* räuberisch lebt, gesellte sich in wenigen Individuen zu dieser vorwiegend  $\alpha$ -mesosaproben Lebensgemeinschaft. Auffallend für diese war, daß *Aspidisca costata*, einer der häufigsten Ciliaten der früheren Versuche, hier nur in wenigen Individuen gefunden wurde (Tab. 15: 2.11.; 10.11. u.a.). Der Reinigungseffekt betrug 90% und mehr. In den folgenden Tagen konnte sogar eine Reinigungswirkung von 95% verzeichnet werden. Hand in Hand mit der Zunahme der Ciliatenzahlen ging ein Anstieg der Durchsichtigkeit des Anlagenabflusses, was der bereits früher gemachten Erfahrung entspricht. Die Durchsichtigkeit des Wassers, ermittelt nach der SNELLSchen Schriftprobe, betrug 35 cm und mehr.

Bei weiteren Untersuchungen wurde versuchsweise die Zugabe von Ammoniak zum Abwasser wieder unterlassen. Der Ammoniak-Gehalt ging dadurch auf rund 1 mg/l, der  $p_H$ -Wert auf durchschnittlich 7,0 herunter. Die Schlammbeschaffenheit und der Reinigungseffekt änderten sich hierbei auffallenderweise praktisch nicht mehr. Bei den Protozoen war ein geringer Rückgang der Individuenzahlen zu beobachten, doch hatte die Lebensgemeinschaft ihre Schwerpunkte bei denselben Arten wie an den Tagen vorher. Es ist daraus zu schließen, daß sich eine Bakterienflora entwickelt hatte, die den Eiweißstickstoff der Milch verwerten konnte.

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die im Molkereibelebschlamm unter den verschiedenen Versuchsbedingungen angetroffene Lebensgemeinschaft und den dabei erzielten Reinigungseffekt.

Die Mikroflora des Molkereibelebschlammes schien manchmal nur aus Fadenbakterien zu bestehen. Nach Zerdrücken der Flocken auf dem Objektträger und Auflegen eines Deckglases konnten auch große Mengen anderer Bakterien, z. B. Kurzstäbchen, einzeln oder in Kolonien, Kokken usw. beobachtet werden, die sich in das Sphaerotilus-Fadenknäuel eingelagert hatten. Zweifellos wird die organische Substanz auch von Sphaerotilus natans abgebaut. Er ist jedoch im Belebtschlamm bei stärkerer Entwicklung wegen der damit verbundenen Blähschlammbildung unerwünscht.

### Belebtschlammverfahren mit Eisenzusatz zum Rohabwasser

#### *Becken 2*

In einem Vorversuch, bei dem das Rohabwasser einen Eisenzusatz von 20 mg/l erhielt, entwickelten sich im Belebungsbecken nach kurzer Zeit dicke Pilzkumpen, die kaum mehr umgewälzt werden konnten. Der ockerbraune Schlamm bestand fast nur aus der Fadenbakterie Sphaerotilus natans und dem Abwasserpilz Apodya lactea. Die Lebensgemeinschaft wies wenige Protozoen auf, von denen nur Paramaecium caudatum in nennenswerter Zahl vorkam.

Zunächst wurde versucht, durch Einschaltung eines Vorbelüftungsbeckens das Wachstum von Apodya lactea im Belebungsbecken zu verhindern. Um in diesem noch eine nennenswerte Eisenmenge zu halten, wurde das Rohabwasser mit 80 mg/l Eisen angereichert, da der größte Teil des Eisens im Vorbelüftungsbecken ausfiel. Das Wachstum von Apodya lactea unterblieb daraufhin im Belebungsbecken, doch bildete sich ein Belebtschlamm, der sich durch übermäßig starke Sphaerotilus-Entwicklung kaum mehr absetzte. Die Lebensgemeinschaft war charakterisiert durch das starke Auftreten des Flagellaten Anthophysa vegetans, der im allgemeinen in typischen Kolonien auftritt. In diesem Falle lösten sich jedoch die Einzelindividuen von ihren Stielen los und rotierten im Wasser. Eine zahlenmäßige Festlegung der Tiere, deren verlassene Stiele recht häufig zu finden waren, war praktisch nicht möglich. Die Einzelindividuen setzten sich im Nachklärbecken nicht ab, so daß der Ablauf durch sie stark ge-

**Tabelle 15**  
**Biologie des Molkerei-Belebtschlammes: Becken 1**

| Datum                       | 21.9. | 9.10. | 16.10. | 26.10. | 2.11. | 10.11. | 19.11. | 25.11. | 1.12. |
|-----------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| KMnO <sub>4</sub> -Zulauf   | 796   | 405   | 402    | 401    | 412   | 351    | 390    | 316    | 380   |
| Verbrauch Ablauf            | 237   | 53    | 57     | 29     | 37    | 30,6   | 27     | 20     | 20    |
| mg/l Abbau%                 | 70    | 87    | 86     | 92     | 90    | 91,3   | 93     | 93,8   | 94,7  |
| Zoogloeen                   | m     | m     | m      | m      | m     | m      | m      | m      | m     |
| Spirillum undulans          | m     | h     | h      | v      | v     | v      | v      | v      | v     |
| Sphaerotilus natans         | m     | m     | m      | sh     | sh    | sh     | sh     | sh     | sh    |
| Chroococcus minutus         | 2000  | 1840  | 1000   | 70     | 240   | 100    | 2000   | 1200   | 2100  |
| Amoeba limax                | 4060  | —     | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Amoeba guttula              | 420   | —     | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Amoeba proteus              | 40    | —     | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Cochliopodium pellucidum    | 60    | —     | —      | —      | —     | —      | —      | 50     | —     |
| Oicomonas termo             | 500   | —     | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Oicomonas mutabilis         | —     | —     | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Anthophysa vegetans         | 1100  | 600   | 60     | 240    | 300   | —      | 20     | —      | —     |
| Bodo saltans                | 140   | 40    | 40     | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Polytoma uvella             | 10    | —     | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Didinium nasutum            | —     | —     | —      | 60     | 60    | 100    | 60     | 40     | 20    |
| Lionotus fasciola           | 140   | 40    | —      | 80     | 280   | 40     | 100    | 60     | 10    |
| Lionotus hirundo            | 40    | 200   | 40     | 300    | —     | 60     | —      | —      | 100   |
| Paramecium caudatum         | 1000  | 600   | 400    | 40     | 60    | 40     | 60     | 60     | 300   |
| Cinetochilium margaritaceum | —     | —     | —      | 240    | —     | —      | 240    | 40     | 40    |
| Glaucoma pyriformis         | 120   | 40    | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Trochilia minuta            | 1500  | 990   | 400    | —      | —     | —      | —      | —      | —     |
| Oxytricha pellionella       | 80    | 20    | 40     | —      | 20    | —      | —      | 140    | 120   |
| Stylonychia mytilus         | 200   | 100   | 40     | 10     | 320   | 900    | 280    | 60     | —     |
| Euplotes charon             | —     | —     | 20     | 260    | 20    | 20     | 40     | 100    | 20    |
| Aspidisca costata           | 400   | 240   | 140    | 420    | —     | 60     | 40     | —      | 10    |
| Opercularia coarctata       | 40    | 40    | 80     | 1000   | 1000  | 200    | 10     | 3920   | 3300  |
| Vorticella convallaria      | 2010  | 3020  | 3120   | 6300   | 4940  | 2600   | 3940   | 20     | —     |
| Podophrya fixa              | 160   | 40    | 80     | 40     | 20    | 20     | 20     | —      | —     |
| Rotaria vulgaris            | —     | 40    | —      | 10     | —     | —      | —      | 40     | 40    |
| Diplogaster spec.           | 100   | 80    | 100    | 240    | 20    | —      | 40     | 40     | 40    |
| Schlammbeschaffenheit       | v     | v     | v      | l      | l     | l      | l      | l      | l     |
| Keimzahlen: Zulauf          | —     | —     | —      | 2140   | 2910  | 4500   | 2700   | 9360   | 10000 |
| Becken                      | —     | —     | —      | 300    | 299   | 700    | 300    | 300    | 240   |
| Ablauf                      | —     | —     | —      | 160    | 175   | 160    | 50     | 190    | 155   |

1 = locker, v = verklumpt, Keimzahlen:  $\times 1000$ .

trübt wurde. Diese Beobachtung ließ vermuten, daß der verhältnismäßig hohe Eisengehalt im Belebtschlamm die Ursache der Koloniauflösung ist, obwohl *Anthophysa vegetans* ein schwach eisenhaltiges Milieu liebt. Es lag daher der Gedanke nahe zu untersuchen, ob eine weitere Eisenanreicherung imstande ist, auch die starke *Sphaerotilus*-verpilzung zu zerteilen.

Das Vorbelüftungsbecken wurde daher beseitigt und das mit 80 mg/l Eisen angereicherte Abwasser direkt in das Belebungsbecken geleitet. Dem Abwasser wurden 20 mg/l Ammoniak zugegeben, um den  $p_H$ -Wert zu erhöhen und damit die Lebensbedingungen für *Apodya lactea* zu verschlechtern, die, wie bereits erwähnt, anfangs stark überhandnahm. Außerdem konnte durch den Ammoniakzusatz der Ammoniak-Stickstoff auf 16—18 mg/l erhöht werden. Schon nach wenigen Tagen wurde der Schlamm lockerer; die *Sphaerotilus*-klumpen zerteilten sich. Der Änderung der Schlammbeschaffenheit ging eine Abnahme der festsitzenden Ciliaten parallel. Von *Vorticella convallaria* wurden nur noch wenige Hundert Individuen gegenüber 2000 bis 3000 der vorausgegangenen Tage gezählt. Im Gegensatz dazu nahmen freischwimmende Ciliaten zu, z. B. *Paramaecium caudatum* und *Stylonychia mytilus*, die sich von etwa 100 auf 1000 Individuen im Kubikzentimeter Wasserschlammgemisch vermehrten. Auffallend zahlreich war in diesem Schlamm, der bis dahin vorwiegend von  $\alpha$ -mesosaprobe Protozoen besiedelt war, auch der polysaprobe Ciliat *Glaucoma scintillans*. *Anthophysa vegetans* trat weiterhin in zahlreichen Einzeltieren auf. Nach etwa einer Woche wurde der Schlamm so locker, daß sich keine zusammenhängenden Flocken mehr bildeten. *Sphaerotilus*-fäden und *Anthophysa*-Einzeltiere wurden durch geringe Strömungen des Ablaufes mitgerissen, so daß dieser sehr stark getrübt war. Seine Durchsichtigkeit betrug etwa 5—10 cm. Wurde der Schlamm ins Absetzglas gebracht, so setzte er überhaupt nicht ab.

Der Eisengehalt des Rohabwassers wurde daraufhin von 80 mg/l auf 40 mg/l herabgesetzt. Es trat eine Besserung der Schlammbeschaffenheit ein. Der Reinigungseffekt, gemessen am Kaliumpermanganatverbrauch, stieg von 88% auf 90—95%. Auch in der Lebensgemeinschaft zeigte die Herabsetzung des Eisengehaltes eine günstige Wirkung. Die Schlammflocken waren fast durchwegs mit größeren Kolonien von *Vorticella convallaria* bewachsen. *Anthophysa vegetans* wurde regelmäßig angetroffen, doch in viel geringeren Mengen als an den Tagen vorher, wobei mitunter auch Kolonien auftraten.

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die bei diesem Versuch im Belebtschlamm angetroffene Lebensgemeinschaft und den dabei erzielten Reinigungseffekt.

### *Becken 3*

Becken 3 wurde mit Abwasser beschickt, das während des Zulaufs zum Belebungsbecken nach dem Pista-Verfahren geeisent wurde. Der Eisengehalt des Abwassers betrug etwa 40 mg/l.

**Tabelle 16**  
 Biologie des Molkerei-Belebtschlammes: *Becken 2* (Eisenzusatz)

| Datum                        |        | 21.9.     | 10.10. | 16.10.  | 26.10. | 3.11.   | 10.11. | 18.11.  |
|------------------------------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| KMnO <sub>4</sub> -          | Zulauf | 796       | 820    | 812     | 746    | 753     | 809    | 820     |
| Verbrauch                    | Ablauf | 270       | 96     | 81      | 76     | 62      | 62     | 95      |
| mg/l                         | Abbau% | 69        | 88     | 90      | 90     | 92      | 88,8   | 88,5    |
| Eisen im Rohabwasser<br>mg/l |        | 20        | 80     | 80      | 80     | 80      | 80     | 80      |
| Zoogloeen                    |        | m         | m      | m       | m      | m       | m      | m       |
| Spirillum undulans           |        | sh        | h      | h       | sh     | sh      | sh     | h       |
| Sphaerotilus natans          |        | m         | m      | m       | sh     | m       | m      | m       |
| Apodya lactea                |        | m         | —      | —       | —      | —       | —      | —       |
| Chroococcus minutus          |        | 1000      | 50     | 600     | 8000   | 1400    | 20     | —       |
| Amoeba limax                 |        | 700       | 20     | 20      | —      | 10      | 10     | 120     |
| Amoeba guttula               |        | 300       | —      | —       | —      | —       | —      | —       |
| Cochliopodium pellucidum     |        | —         | —      | —       | 100    | —       | —      | —       |
| Oicomonas termo              |        | 60        | —      | —       | —      | —       | —      | —       |
| Anthophysa vegetans          |        | 20000 E*) | —      | 64000 E | —      | 30000 E | —      | 20000 E |
| Bodo saltans                 |        | 180       | 240    | 240     | —      | —       | —      | —       |
| Trigonomonas compressa       |        | 10        | —      | —       | —      | —       | —      | —       |
| Peranema trichophorum        |        | 16        | —      | —       | —      | —       | 20     | —       |
| Didinium nasutum             |        | —         | 20     | —       | 40     | 60      | —      | 20      |
| Lionotus fasciola            |        | —         | 40     | 150     | 20     | 500     | —      | —       |
| Lionotus hirundo             |        | 100       | 60     | —       | 60     | —       | —      | 100     |
| Trochilia minuta             |        | —         | 80     | —       | —      | —       | —      | —       |
| Paramaecium caudatum         |        | 100       | 180    | 40      | 100    | 100     | 180    | 1200    |
| Chilodonella cucullata       |        | —         | —      | —       | —      | —       | —      | 10      |
| Glaucoma scintillans         |        | —         | —      | —       | —      | —       | —      | 1640    |
| Oxytricha pellionella        |        | 40        | —      | —       | —      | —       | —      | —       |
| Stylonychia mytilus          |        | 480       | 20     | 10      | —      | 80      | 600    | 800     |
| Euplotes charon              |        | —         | —      | 40      | 80     | —       | —      | —       |
| Aspidisca costata            |        | 440       | 120    | 40      | 80     | 20      | —      | —       |
| Opercularia coarctata        |        | —         | 60     | 140     | 20     | —       | —      | —       |
| Vorticella convallaria       |        | 500       | 840    | 2100    | 2380   | 1600    | 640    | 340     |
| Podophrya fixa               |        | 60        | 20     | 60      | 20     | 40      | —      | 20      |
| Diplogaster spec.            |        | 100       | 40     | 80      | 140    | 100     | 20     | 40      |
| Keimzahlen: Zulauf           |        | —         | —      | —       | 7600   | 5900    | 2880   | 4500    |
| Becken                       |        | —         | —      | —       | 490    | 2440    | 1450   | 560     |
| Ablauf                       |        | —         | —      | —       | 200    | 1740    | 1250   | 290     |

\*) E = Einzeltiere

Tabelle 16 (Fortsetzung)

| Datum                                    |         | 25. 11. | 2. 12. | 11. 12. | 16. 12. | 19. 12. |
|------------------------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| KMnO <sub>4</sub> -<br>Verbrauch<br>mg/l | Zulauf  | 720     | 740    | 762     | 663     | 695     |
|                                          | Ablauf  | 95      | 38     | 75      | 25      | 35      |
|                                          | Abbau % | 87      | 95     | 90      | 96      | 95      |
| Eisen im Rohabwasser mg/l                |         | 40      | 40     | 40      | 40      | 40      |
| Zoogloeen                                |         | m       | m      | m       | m       | m       |
| Spirillum undulans                       |         | v       | v      | v       | v       | v       |
| Sphaerotilus natans                      |         | sh      | sh     | sh      | sh      | sh      |
| Chroococcus minutus                      |         | 300     | —      | 480     | 2240    | 160     |
| Amoeba limax                             |         | 20      | —      | —       | —       | —       |
| Amoeba guttula                           |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Cochliopodium pellucidum                 |         | —       | 20     | 20      | —       | —       |
| Oicomonas termo                          |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Anthophysa vegetans                      |         | 400 K*) | 220 K  | 200 K   | 300 K   | 300 K   |
| Bodo saltans                             |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Trigonomonas compressa                   |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Peranema trichophorum                    |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Didinium nasutum                         |         | —       | 20     | 30      | 40      | 20      |
| Lionotus fasciola                        |         | 20      | —      | —       | —       | —       |
| Lionotus hirundo                         |         | 200     | 100    | 100     | 40      | 40      |
| Trochilia minuta                         |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Paramaecium caudatum                     |         | 500     | 20     | 40      | 20      | —       |
| Chilodonella cucullata                   |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Glaucoma scintillans                     |         | 1000    | —      | —       | 40      | 150     |
| Oxytricha pellionella                    |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Stylonychia mytilus                      |         | 180     | 120    | 100     | 100     | 20      |
| Euplotes charon                          |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Aspidisca costata                        |         | —       | 80     | 240     | 40      | 380     |
| Opercularia coarctata                    |         | —       | 20     | —       | —       | —       |
| Vorticella convallaria                   |         | 340     | 3000   | 3000    | 6200    | 7000    |
| Podophrya fixa                           |         | 20      | —      | 20      | —       | 20      |
| Diplogaster spec.                        |         | 100     | 40     | 20      | 20      | 20      |
| Keimzahlen:                              | Zulauf  | 10 000  | 5600   | —       | —       | 4240    |
|                                          | Becken  | 6040    | 600    | —       | —       | 500     |
|                                          | Ablauf  | 4000    | 320    | —       | —       | 400     |

\*) K = Kolonien von Anthophysa vegetans

Es bildete sich ein rostbrauner Schlamm, der neben den verschiedensten Bakterien nur eine geringe Zahl an Protozoen enthielt. Die Lebensgemeinschaft bestand vorwiegend aus wenigen  $\alpha$ -mesosaprobe Ciliatenarten, die mit großer Regelmäßigkeit zwischen den belebten Flocken lebten. Der Ciliat Vorticella convallaria, der auch bei diesem Versuch dominierte, erreichte Individuenzahlen zwischen 500 und 1000 im Kubikzentimeter, wäh-

rend er im Molkereibelebtschlamm ohne Eisenzusatz fast stets in mehreren Tausenden/cm<sup>3</sup> vorkam. Auch die Arten *Linotus fasciola*, *Oxytricha pelliola* und *Stylonychia mytilus* waren nicht so zahlreich anzutreffen wie im normalen Belebtschlamm; mehr als 100 Individuen im Kubikzentimeter waren selten. Ganz vereinzelt barg der Schlamm *Opercularia coarctata*, *Aspidisca costata* und *Euplotes charon*.

Anders wie die genannten Organismen verhielten sich gegenüber Eisenzusatz lediglich *Paramecium caudatum* und *Podophrya fixa*. Während *Podophrya fixa* etwa in gleicher Menge wie im Molkereibelebtschlamm ohne Eisenzusatz auftrat, lebte *Paramecium caudatum* mitunter sogar häufiger im Eisenbelebtschlamm. *Paramecium caudatum* scheint demnach gegenüber

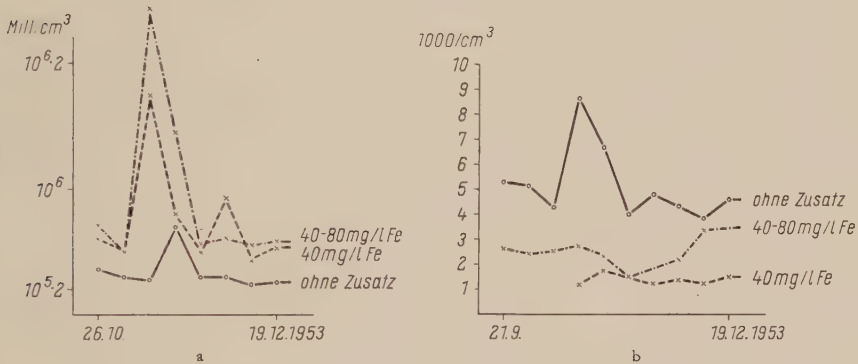


Abb. 22. a) Vergleich der Keimzahlen.

b) Vergleich der Protozoenzahlen.

höherem Eisengehalt (40 mg/l) unempfindlich zu sein. Diese Beobachtung wurde bereits bei Versuchen mit städtischem Abwasser gemacht.

Nach einigen Wochen Versuchsdauer wurde der Schlamm etwas voluminöser, doch blieb das biologische Bild das nämliche wie zuvor. *Sphaerotilus natans* war zahlreich an den Schlammflocken anzutreffen, doch setzte der grobflockige Schlamm im Standglas gut ab und hinterließ eine klare Wassersäule. Die Durchsichtigkeit des Ablaufs nach der Snellschen Probe betrug etwa 20 cm. Der Reinigungseffekt, bezogen auf den Kaliumpermanganatverbrauch, lag bei einer Raumbelastung von 3 l/l/Tag meist über 90%, im Durchschnitt bei 95% (Tabelle 17).

Ein Vergleich der Protozoenzahlen der Becken 1–3 (Abb. 22) zeigt, daß diese im Durchschnitt in Becken 2 (40 bzw. 80 mg/l Eisenzusatz) und in Becken 3 (40 mg/l Eisenzusatz) niedriger liegen als in Becken 1 (ohne Zusatz). Durch Eisenzusatz zum Rohabwasser wird die Entwicklung der Protozoen eingeschränkt. Dagegen sind die Keimzahlen im Eisenbelebtschlamm deutlich höher als im nicht geeisentem Belebtschlamm, was den bereits oben

**Tabelle 17**  
 Biologie des Molkerei-Belebtschlammes: *Becken 3* (Eisenzusatz)

| Datum                    |         | 21. 10.  | 26. 10. | 3. 11. | 10. 11. | 18. 11. |
|--------------------------|---------|----------|---------|--------|---------|---------|
| KMnO <sub>4</sub> -      | Zulauf  | 796      | 809     | 796    | 757     | 805     |
| Verbrauch                | Ablauf  | 242      | 177     | 69     | 79      | 39,5    |
| mg/l                     | Abbau % | 70       | 78      | 91,3   | 89,8    | 95      |
| Zoogloeen                |         | m        | m       | m      | m       | m       |
| Spirillum undulans       |         | sh       | h       | v      | h       | v       |
| Sphaerotilus natans      |         | sh       | h       | sh     | sh      | h       |
| Chroococcus minutus      |         | 5000     | 280     | —      | 2000    | 190     |
| Amoeba limax             |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Amoeba guttula           |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Cochliopodium pellucidum |         | —        | 100     | —      | —       | —       |
| Oicomonas termo          |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Oicomonas mutabilis      |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Anthophysa vegetans      |         | 2000 K*) | 100 K   | 100 K  | 140 K   | 140 K   |
| Bodo saltans             |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Bodo putrinus            |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Peranema trichophorum    |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Polytoma uvella          |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Didinium nasutum         |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Lionotus fasciola        |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Lionotus hirundo         |         | —        | 20      | 20     | —       | —       |
| Trochilia minuta         |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Paramaecium caudatum     |         | 240      | 280     | 1000   | 500     | 300     |
| Chilodonella cucullata   |         | 300      | —       | —      | —       | —       |
| Glaucoma scintillans     |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Oxytricha pellionella    |         | 40       | 20      | 20     | —       | —       |
| Stylonychia mytilus      |         | 40       | 20      | 40     | 100     | 60      |
| Euplotes charon          |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Aspidisca costata        |         | —        | 20      | 10     | 20      | 20      |
| Opercularia coarctata    |         | —        | —       | 10     | 10      | 40      |
| Vorticella convallaria   |         | 220      | 840     | 700    | 910     | 840     |
| Podophrya fixa           |         | 10       | 10      | 10     | —       | 40      |
| Rotaria vulgaris         |         | —        | —       | —      | —       | —       |
| Diplogaster spec.        |         | 60       | 60      | 140    | 140     | 100     |
| Keimzahlen:              | Zulauf  | —        | 4160    | 3990   | 2850    | 3200    |
|                          | Becken  | —        | —       | 1760   | 800     | 500     |
|                          | Ablauf  | —        | 1500    | 505    | 220     | 32      |

besprochenen Ergebnissen der Versuche mit städtischem Abwasser entspricht.

Die Schlammkonzentration betrug bei den Versuchen mit Molkereiabwasser 500—1500 mg/l. Eine höhere Konzentration konnte infolge der lockeren Beschaffenheit des Molkereibelebtschlammes in den Becken nicht erzielt werden.

Tabelle 17 (Fortsetzung)

| Datum                    |         | 25. 11. | 1. 12. | 11. 12. | 19. 12. | 22. 12. |
|--------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| KMnO <sub>4</sub> -      | Zulauf  | 650     | 735    | 790     | 771     | 742     |
| Verbrauch                | Ablauf  | 58      | 21,5   | 40      | 25      | 29      |
| mg/l                     | Abbau % | 91      | 97     | 95      | 97      | 96      |
| Zoogloeen                |         | m       | m      | m       | m       | m       |
| Spirillum undulans       |         | v       | v      | —       | —       | —       |
| Sphaerotilus natans      |         | h       | h      | sh      | sh      | sh      |
| Chroococcus minutus      |         | 500     | —      | —       | —       | —       |
| Amoeba limax             |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Amoeba guttula           |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Cochliopodium pellucidum |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Oicomonas termo          |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Oicomonas mutabilis      |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Anthophysa vegetans      |         | 100 K   | 100 K  | 400 K   | 300 K   | 160 K   |
| Bodo saltans             |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Bodo putrinus            |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Peranema trichophorum    |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Polytoma uvella          |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Didinium nasutum         |         | —       | —      | 10      | 10      | —       |
| Lionotus fasciola        |         | —       | —      | —       | 20      | 20      |
| Lionotus hirundo         |         | 20      | 40     | —       | 60      | 40      |
| Trochilia minuta         |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Paramaecium caudatum     |         | 500     | 100    | 500     | 400     | 100     |
| Chilodonella cucullata   |         | 20      | —      | 40      | 40      | 40      |
| Glaucoma scintillans     |         | —       | —      | 40      | —       | —       |
| Oxytricha pellationella  |         | —       | —      | —       | —       | —       |
| Stylonychia mytilus      |         | 40      | 40     | 40      | 40      | —       |
| Euplotes charon          |         | 20      | 20     | —       | —       | —       |
| Aspidisca costata        |         | 10      | 80     | 20      | 20      | 40      |
| Opercularia coarctata    |         | —       | —      | —       | 10      | 20      |
| Vorticella convallaria   |         | 800     | 1000   | 1020    | 1000    | 1800    |
| Podophrya fixa           |         | 20      | —      | 40      | 40      | 20      |
| Rotaria vulgaris         |         | —       | —      | 10      | —       | —       |
| Diplogaster spec.        |         | —       | —      | —       | 20      | —       |
| Keimzahlen:              | Zulauf  | 10800   | —      | 4000    | 4100    | —       |
|                          | Becken  | 710     | —      | 540     | 510     | —       |
|                          | Ablauf  | 375     | —      | 350     | 420     | —       |

Zusammenfassend ergibt sich aus den Versuchen mit Molkereiabwasser:

1. Im Molkereibelebtschlamm tritt *Sphaerotilus natans* in starker Entwicklung auf. Der Schlamm ist daher nicht so flockig wie Belebtschlamm aus städtischem Abwasser.
2. Belebtschlamm aus Molkereiabwasser mit einem KMnO<sub>4</sub>-Verbrauch von 800 mg/l und einer Raumbelastung von 4 l/l/Tag beherbergt neben vielen Spirillen eine große Zahl an polysaprobien und  $\alpha$ -mesosaprobien Flagellaten

- und Amöben. Ciliaten sind mit mehreren Arten vertreten, erreichen aber insgesamt bei weitem nicht die Individuenzahlen des Belebtschlammes aus städtischem Abwasser.
3. Belebtschlamm aus Molkereiabwasser ohne Eisenzusatz mit einem  $\text{KMnO}_4$ -Verbrauch von 400 mg/l und gleicher Raumbelastung, sowie Belebtschlamm aus geeisentem Molkereiabwasser mit einem  $\text{KMnO}_4$ -Verbrauch von 800 mg/l weisen eine vorwiegend  $\alpha$ -mesosaprobe Protozoenfauna auf, in der Ciliaten dominieren.
  4. Ein Zusatz von etwa 20 mg/l Ammoniak zum Molkereiabwasser wirkt günstig auf die Bildung eines gut absetzbaren Schlammes und auf die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft. Er scheint das Wachstum von *Apodya lactea* zu unterdrücken.
  5. Das Wachstum der Bakterien wird durch Eisenzusatz zum Rohabwasser gefördert, während die Protozoen dadurch in ihrer Entwicklung gehemmt werden.
  6. Direkter Zufluß stark geeisenten Abwassers (80 mg/l) wirkt ungünstig auf die Protozoenfauna. Die Zahl der Protozoen geht hierbei beträchtlich zurück, was sich stark auf die Klarheit des gereinigten Wassers auswirkt.
  7. Eisenzusatz von 40 mg/l, besonders aber von 80 mg/l, verursacht eine Zerteilung der Zellkolonien von *Anthophysa vegetans* und *Sphaerotilus natans*, so daß ein sehr lockerer Schlamm entsteht, der sich nur langsam absetzt.

## Diskussion

Nach JUNG (1939, 1948) PHELPS und BEVAN (1942) besitzt mit Eisen angereicherter Belebtschlamm große Adsorptions- und Oxydationskraft und setzt schnell ab. Die Belüftungszeit kann stark verringert werden. Eisen stellt einen wirksamen Schutz gegen die Bildung von Blähschlamm dar.

WUHRMANN (1953) dagegen ist der Ansicht, daß Zusätze anorganischer Art zum Belebtschlamm keine Verbesserung des Verfahrens mit sich bringen. WUHRMANN arbeitete mit hochbelasteten Belebtschlammanlagen, die auch ohne jegliche Zusätze gleichgute Ergebnisse lieferten. Die Versuche wurden mit relativ dünnem städtischen Abwasser durchgeführt.

Für meine Versuche stand Abwasser ähnlicher Zusammensetzung zur Verfügung. Sie ergaben, daß mit Eisenzusatz zum Rohabwasser kein höherer Reinigungseffekt erzielt wird als ohne Zusatz. Es konnten kaum Unterschiede in der Abbauwirkung hinsichtlich des Permanganatverbrauchs bzw. Biochemischen Sauerstoffbedarfs festgestellt werden. Lediglich bei der Einarbeitung des Schlammes erwies sich eine Eisenergung des Abwassers als sehr vorteilhaft. Durch den Eisenzusatz wurde die Flockenbildung begünstigt und so die für den Reinigungseffekt wichtige Schlammkonzentration schneller erreicht als beim normalen Verfahren. Nach der Einarbeitung glichen sich

jedoch Schlammkonzentration und Reinigungseffekt aller Anlagen weitgehend einander an.

Im Gegensatz zu den Versuchen zur Reinigung von städtischem Abwasser erwies sich Eisenzusatz bei Versuchen zur Reinigung von Molkereiabwasser als sehr günstig. Das Eisenbelebtschlammverfahren zeigte sich dem normalen Verfahren deutlich überlegen. Durch Eisenzusatz zum Rohabwasser konnte bei gleicher Belastung wie ohne Zusatz eine doppelt so hohe Konzentration des Rohabwassers bis zu gleich hohem Reinigungsgrad behandelt werden. Besonders gute Ergebnisse zeitigte die Eisenung des Abwassers nach dem Pistaverfahren. Der Schlamm setzte gut ab und wies eine günstig zusammengesetzte Lebensgemeinschaft mit einer hohen Bakterienanzahl auf.

Im geeisenten Molkereibelebtschlamm wie auch im geeisenten Belebtschlamm aus städtischem Abwasser waren die Keimzahlen bei allen Versuchen gegenüber dem normalen Verfahren stark erhöht. Es bestätigt sich hier die auch von anderer Seite schon wiederholt gemachte Beobachtung, daß Eisen die Entwicklung der Bakterien fördert.

PHELPS und BEVAN (1942) fanden, daß durch 5—10 mg/l Eisen zum Abwasser das Wachstum der Bakterien im Belebtschlamm angeregt wird. Auch JUNG (1948) konnte beim Belebtschlammverfahren ähnliche Erfahrungen machen.

HORASAWA (1950) dagegen ist der Ansicht, daß die Bedeutung des Eisens bei der Schlammbelebung darin besteht, daß der Schlamm dadurch kompakter und absetzbarer wird. Auch anderen Zusätzen, z. B. Aluminium, kommt die gleiche Bedeutung zu.

Meine Untersuchungen zeigen, daß beide Ansichten zutreffen. Durch Eisenzusatz zum Rohabwasser erhöhen sich die Keimzahlen und der Schlamm wird schwerer. Die Eisenflocken, aber auch die Aluminiumhydroxydflocken, bieten den Wasserbakterien willkommene Ansatzflächen. Die hohen Keimzahlen im Aluminiumbelebtschlamm dürften auf die große Oberflächenwirkung der Aluminiumhydroxydflocken zurückzuführen sein. Bei Eisen dagegen ist die große Oberfläche der Eisenhydroxydflocken nicht allein ausschlaggebend für die erhöhten Keimzahlen, denn Eisen begünstigt das Wachstum der Bakterien auch dann, wenn es nicht als Hydroxyd ausfällt.

REMY (1916) konnte durch Zugabe von 5 mg/l Eisen zu Nährlösungen (Azotobacter-Kulturen) eine starke Bakterienentwicklung erzielen, während ohne Zusatz das Wachstum der Bakterien fast unterblieb. Er erwähnt ähnliche Untersuchungsergebnisse von KASERER, wonach Eisen eine physiologische Wirkung auf das Bakterienwachstum ausübt. Auch BEGER (1952) berichtet, daß in Bakterienkulturen für Trinkwasseranalysen die Zugabe eines Stückchens frisch geglühten Eisendrahtes überraschende Wirkungen zeigt. Eisen wirkt stark wachstumsfördernd auf die Bakterien.

Die starke Entwicklung der Bakterien im Eisenbelebtschlamm ist also einerseits auf die durch die Eisenflocken geschaffene vergrößerte Oberfläche

zurückzuführen, andererseits auf die das Bakterienwachstum fördernde physiologische Wirkung des Eisens überhaupt. Man könnte erwarten, daß im Eisenbelebtschlamm Eisenbakterien auftreten. Sie sind jedoch bei meinen Versuchen kaum beobachtet worden. Nur bei einem Versuch konnten kurze Zeit (etwa 8 Tage) Bakterien der Gattung *Crenothrix* gefunden werden. Diese waren aber auch zur gleichen Zeit im ungeeisenten Schlamm vorhanden. Wahrscheinlich werden die Eisenbakterien durch die starke organische Verunreinigung an der Entwicklung gehindert.

Umgekehrt wie die Keimzahlen verhielten sich die Protozoenzahlen des Belebtschlammes. Diese waren im Eisenbelebtschlamm niedriger als in gewöhnlichem Schlamm. Vor allem 40 mg/l Eisen und mehr schränkten die Entwicklung der Protozoen merklich ein. Fast alle Protozoenarten wurden im Eisenbelebtschlamm in wesentlich geringerer Zahl angetroffen als im normalen Schlamm. Lediglich bei dem Ciliaten *Paramaecium caudatum* und dem Sauginfusor *Podophrya fixa* ergaben sich hinsichtlich der Individuenzahlen kaum Unterschiede bei beiden Verfahren. Charakteristisch für den Eisenbelebtschlamm war das stärkere Auftreten des Flagellaten *Anthophysa vegetans*. Von diesem Flagellaten ist bekannt, daß er eine Vorliebe für eisenhaltiges Wasser hat. Da aber im Belebtschlamm aus stark geeisentem städtischen- (40 mg/l Fe) bzw. Molkereiabwasser (40 mg/l, 80 mg/l Fe) fast nur Einzeltiere der Flagellatenkolonie, jedoch kaum typische Kolonien auftraten, ist anzunehmen, daß der hohe Eisengehalt auf die Koloniebildung hemmend wirkt.

Die Durchsichtigkeit des gereinigten Abwassers erreichte in den Becken, die Abwasser mit Eisenzusatz erhielten, selten die hohen Werte des normalen Schlammes. Nach VIEHL (1937) üben die Protozoen des Schlammes einen starken Einfluß auf die Klarheit und Durchsichtigkeit des gereinigten Wassers aus. Diese Beobachtung VIEHLS gibt eine Erklärung für die im Durchschnitt geringere Durchsichtigkeit des Anlagenabflusses der Becken mit Eisenzusatz.

Mehrere Arbeiten, besonders die von KOLKWITZ (1926), BARITT (1940), BARKER (1949) und HORASAWA (1950) zeigen, daß sich nach der Einarbeitung des Schlammes eine typische Protozoenfauna herausbildet, die von relativ wenigen Ciliatenarten beherrscht wird. Auch ich fand bei monatelangen Untersuchungen des Belebtschlammes eine charakteristische Lebensgemeinschaft, die neben Bakterienzoogloeen vorwiegend die Ciliaten *Aspidisca costata*, *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria*, zumindest aber eine dieser Ciliatenarten, in besonders großer Zahl enthielt. Zu diesen Leitformen gesellten sich in geringerer Zahl verschiedene andere Ciliatenarten, z. B. *Paramaecium caudatum*, *Lionotus fasciola*, *Oxytricha pellionella*, *Euplothes charon*, das Sauginfusor *Podophrya fixa*, seltner Flagellaten und Amöben.

Mit einer Erhöhung der Schlammkonzentration ging eine Zunahme der Ciliatenzahlen Hand in Hand. MÖHLE (1955) dagegen fand im hochbelasteten

Schlamm bei hohen Schlammkonzentrationen von den Protozoen nur noch Flagellaten in nennenswerter Zahl. Ciliaten traten praktisch überhaupt nicht auf. Die abweichenden Ergebnisse hinsichtlich der Ausbildung der Ciliatenfauna dürften in erster Linie auf die verschiedenen Sauerstoffmengen im Wasserschlammgemisch in beiden Anlagen zurückzuführen sein. Der Sauerstoffgehalt betrug bei meinen Versuchen auch bei starker Belastung (16 l/Tag) stets über 2 mg/l, während MÖHLE mit Sauerstoffmengen von 0,5—1 mg/l arbeitet. Wie VIEHL (1942) bei Untersuchungen über den Einfluß des Sauerstoffgehaltes auf die Schlammbiozönose festgestellt hat, wird bei Sauerstoffmengen unter 1,5 mg/l im Schlamm die Ciliatenfauna merklich eingeschränkt. Der Schlamm enthält nur noch Flagellaten in größerer Zahl. Auch WUHRMANN (1953) berichtet, daß bei seinen Versuchen mit hochbelasteten Belebtschlammanlagen die Zahl der Ciliaten sehr gering war. Mit Besserung der Sauerstoffverhältnisse im Schlamm nahmen diese aber zu.

Im Belebtschlamm aus Molkereiabwasser traten dieselben Organismen auf wie im Belebtschlamm aus städtischem Abwasser. Nur in der quantitativen Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft zeigten sich Unterschiede.

Im Belebtschlamm aus städtischem Abwasser waren *Aspidisca costata*, *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria* die weitaus häufigsten Protozoenarten, im Molkereibelebtschlamm hingegen lebte nur *Vorticella convallaria* in großer Zahl. *Aspidisca costata* und *Opercularia coarctata* entwickelten sich nur in wenigen Individuen. Für *Aspidisca costata* konnte bei den Versuchen mit städtischem Abwasser gefunden werden, daß dieser Ciliat eine deutliche Bindung an die Nitrifikation aufweist. Da im Belebtschlamm aus Molkereiabwasser bei der Raumbelastung von 3—4 l/Tag keine Nitrifikation einsetzte, liegt der Gedanke nahe, daß hierin mit die Ursache für das zahlenmäßig geringe Auftreten des Ciliaten zu suchen ist. Die Ciliaten *Paramaecium caudatum*, *Stylonychia mytilus*, *Oxytricha pelloionella* und andere freischwimmende Formen lebten im Durchschnitt im Molkereibelebtschlamm häufiger als im städtischem Belebtschlamm, was aber den Ausfall an *Opercularia coarctata* und *Aspidisca costata* nicht ausgleichen konnte, so daß die Ciliatengesamtzahlen im Molkereibelebtschlamm im allgemeinen geringer waren als dort. Die Fadenbakterie *Sphaerotilus natans*, die im städtischen Belebtschlamm regelmäßig mit wenigen Fäden vorhanden war und nur bei Blähschlambildung überhand nahm, war im Molkereibelebtschlamm stets in großen Mengen entwickelt.

Die insgesamt bei meinen Versuchen im Belebtschlamm angetroffene Lebensgemeinschaft ist in Tabelle 18 zusammen mit Angaben von KOLKWITZ (1926), VIEHL (1934), BEGER (1935) und BARKER (1949) aufgeführt.

Beim Studium der Arbeiten von HOFFMANN (1940), BARITT (1940), REYNOLDSON (1942) u. a. gewinnt man den Eindruck, daß die Angabe der Gattungen allein genügen würde, den Belebtschlamm zu charakterisieren. Dies trifft aber nicht zu. Man muß sich darüber im klaren sein, daß sich ein-

Tabelle 18

Mikroskopisch feststellbare Organismen im normalen Schlamm

|                                   | Literatur <sup>1)</sup> | eigene Ergeb. |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------|
| <i>Zoogloea ramigera</i>          | x                       | x             |
| <i>Spirillum undulans</i>         | x                       | x             |
| <i>Sphaerotilus natans</i>        | x                       | x             |
| <i>Beggiatoa alba</i>             | x                       | —             |
| <i>Chroococcus minutus</i>        | —                       | x             |
| <i>Oscillatoria limosa</i>        | x                       | —             |
| <i>Amoeba proteus</i>             | x                       | x             |
| <i>Amoeba radiosa</i>             | x                       | —             |
| <i>Amoeba limax</i>               | x                       | x             |
| <i>Amoeba guttula</i>             | —                       | x             |
| <i>Amoeba actinosphaerium</i>     | x                       | —             |
| <i>Cochliopodium pellucidum</i>   | —                       | x             |
| <i>Cochliopodium spec.</i>        | x                       | —             |
| <i>Arcella vulgaris</i>           | x                       | —             |
| <i>Oicomonas termo</i>            | —                       | x             |
| <i>Pleuromonas jaculans</i>       | x                       | —             |
| <i>Anthophysa vegetans</i>        | —                       | x             |
| <i>Amphimonas spec.</i>           | x                       | —             |
| <i>Bodo putrinus</i>              | x                       | —             |
| <i>Bodo spec.</i>                 | —                       | —             |
| <i>Didinium nasutum</i>           | x                       | x             |
| <i>Trachelophyllum pusillum</i>   | —                       | x             |
| <i>Trochilia minuta</i>           | —                       | x             |
| <i>Lionotus fasciola</i>          | x                       | x             |
| <i>Lionotus hirundo</i>           | —                       | x             |
| <i>Lionotus anser</i>             | x                       | —             |
| <i>Loxodes rostrum</i>            | x                       | —             |
| <i>Chilodonella cucullata</i>     | x                       | x             |
| <i>Chilodonella uncinata</i>      | x                       | x             |
| <i>Dysteria spec.</i>             | x                       | —             |
| <i>Paramaecium caudatum</i>       | x                       | x             |
| <i>Cinetochilium margaretaeum</i> | —                       | x             |
| <i>Uronema marinum</i>            | —                       | x             |
| <i>Oxytricha spec.</i>            | x                       | —             |
| <i>Oxytricha pellionella</i>      | x                       | x             |
| <i>Stylonychia spec.</i>          | x                       | —             |
| <i>Stylonychia mytilus</i>        | —                       | x             |
| <i>Euplotes spec.</i>             | x                       | —             |
| <i>Euplotes charon</i>            | —                       | x             |
| <i>Aspidisca spec.</i>            | x                       | —             |

x = vorhanden,

— = nicht vorhanden

<sup>1)</sup> = KOLKWITZ (1926), VIEHL (1934), BEGER (1935), BARKER (1949)

Tabelle 18 (Fortsetzung)

|                               | Literatur <sup>1)</sup> | eigene Ergeb. |
|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| <i>Aspidisca costata</i>      | x                       | x             |
| <i>Vorticella alba</i>        | x                       | —             |
| <i>Vorticella putrina</i>     | x                       | —             |
| <i>Vorticella longifolium</i> | x                       | —             |
| <i>Vorticella campanula</i>   | x                       | —             |
| <i>Vorticella convallaria</i> | x                       | x             |
| <i>Opercularia spec.</i>      | x                       | —             |
| <i>Opercularia coarctata</i>  | —                       | x             |
| <i>Opercularia berberina</i>  | x                       | —             |
| <i>Epistylis plicatilis</i>   | x                       | —             |
| <i>Carchesium lachmanni</i>   | x                       | —             |
| <i>Podophrya fixa</i>         | x                       | x             |
| <i>Rotifer vulgaris</i>       | x                       | x             |
| <i>Eosphora najas</i>         | —                       | x             |
| <i>Aeolosoma spec.</i>        | x                       | x             |
| <i>Diplogaster spec.</i>      | x                       | x             |

x == vorhanden,

— == nicht vorhanden

<sup>1)</sup> = KOLKWITZ (1926), VIEHL (1934), BEGER (1935), BARKER (1949)

zelne Arten einer Gattung ökologisch ganz verschieden verhalten können. Nach LIEBMANN (1951) bilden sich je nach dem Abbaugrad der organischen Substanz im Wasser Lebensgemeinschaften aus, die durch bestimmte Leitformen charakterisiert sind. Zu manchen Gattungen gehören Arten, die von der typischen Abwasserform bis zur Reinwasserform reichen. Als Beispiel hierfür sei die Gattung *Vorticella* angeführt.

Nach LIEBMANN (1951) sind:

- V. *microstoma* charakteristisch für außerordentlich stark verunreinigtes Wasser (polysaprob),
- V. *convallaria* charakteristisch für stark verunreinigtes Wasser ( $\alpha$ -mesosaprob),
- V. *campanula* charakteristisch für mäßig verunreinigtes Wasser ( $\beta$ -mesosaprob),
- V. *nebulifera* charakteristisch für kaum verunreinigtes Wasser (oligosaprob).

Die Gattung *Vorticella* war bei meinen Versuchen im Belebtschlamm mit zwei Arten vertreten, nämlich *Vorticella microstoma* und *Vorticella convallaria*. Während der polysaprobe Ciliat V. *microstoma* in der Lebensgemeinschaft im weniger wirksamen Schlamm zu finden war, konnte die  $\alpha$ -mesosaprobe Form bei guter Reinigungsleistung sehr zahlreich beobachtet werden. Wenn also REYNOLDSOON (1942) und HOFFMANN (1940) die

Gattung *Vorticella* als typisch für wirksamen Belebtschlamm bezeichnen, so ist dies mit Vorbehalt aufzunehmen. Weiter muß gegenüber REYNOLDSON (1942) betont werden, daß es wenig erfolgversprechend ist, die Beschaffenheit des Schlammes nur mit einer einzelnen Organismenart charakterisieren zu wollen. Bei der Beurteilung des Belebtschlammes ist genau wie bei biologischen Wasseranalysen in der Natur das Hauptaugenmerk auf die gesamte Lebensgemeinschaft zu legen. „Aber nur Lebensgemeinschaften, nicht einzelne Tiere sind für die biologische Auswertung des Wassers brauchbar“ (LIEBMANN 1947).

In zahlreichen früheren Arbeiten wurde bereits versucht, einen Zusammenhang zwischen Biozönose und Reinigungsleistung des Schlammes zu finden. Nach SIERP (1934), HAMBURG-EISENSTEIN (1933), BARITT (1940) u. a. soll bei guter Reinigungswirkung der Schlamm eine bestimmte Mindestzahl an Protozoen enthalten. Von einem Belebtschlamm in guter Verfassung erwarten sie nur einen geringen Flagellaten- und Amoebengehalt. Die Lebensgemeinschaft soll vorwiegend aus Ciliaten bestehen.

Auch bei meinen Versuchen waren bei guter Reinigungswirkung des Schlammes die Ciliaten dominierend, wobei *Opercularia coarctata*, *Vorticella convallaria* und *Aspidisca costata* besonders zahlreich auftraten. Die Lebensgemeinschaft zeigte ein  $\alpha$ - bis  $\beta$ -mesosaprobies Gepräge. Bei schwacher Belastung entwickelten sich  $\beta$ -mesosaprobe Organismen in größerer Zahl (hauptsächlich *Aspidisca costata*), während bei stärkerer Belastung vor allem  $\alpha$ -mesosaprobe Formen (hauptsächlich *Vorticella convallaria*) dominierten.

In Tabelle 19 sind die von verschiedenen Autoren für wirksamen Belebtschlamm als typisch bezeichneten Organismen und die von mir hierbei angegebene Lebensgemeinschaft angegeben.

Wie REYNOLDSON (1942) ausführt, besteht eine direkte Analogie zwischen Reinigungswirkung des Schlammes und dessen Gehalt an *Vorticella*. Die Anzahl der Vorticelliden weist eine Beziehung zur Abflußqualität auf. Auch SIERP (1942) berichtet von Ergebnissen, die auf einen Zusammenhang zwischen Reinigungswirkung des Schlammes und Vorticellidenzahlen hindeuten.

BAINES und Mitarbeiter (1954) fanden, daß weniger die Individuenzahlen einzelner Ciliatenarten, sondern mehr die Ciliatengesamtzahl häufig eine Beziehung zur Abflußqualität, gemessen am Permanganatverbrauch bzw. Biochemischen Sauerstoffbedarf, zeigen.

Bei meinen Versuchen wiesen die Leitformen *Aspidisca costata*, *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria*, die, wie oben schon erwähnt, die häufigsten Besiedler des Schlammes waren, fast stets eine gewisse Beziehung zur Abflußqualität der Anlage auf. Nahmen diese an Zahl zu, wurde der Reinigungseffekt besser, gingen sie aber stark zurück bzw. verschwanden ganz, was gleichzeitig von einer Zunahme polysaprobier Protozoen begleitet war, wurde die Reinigungswirkung, gemessen am Permanganatverbrauch bzw. Biochemischen Sauerstoffbedarf, geringer. Irgendwelche Verhältnis-

Tabelle 19

Mikroskopisch feststellbare Organismen im Belebtschlamm bei guter Reinigungsleistung

|                                | TAYLOR<br>1930 | SIERP<br>1934 | HAMBURG<br>1933 | BARITT<br>1940 | eigene<br>Ergebn. |
|--------------------------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|
| <i>Lionotus fasciola</i>       | —              | —             | —               | —              | x                 |
| <i>Spirostomum teres</i>       | —              | —             | x               | —              | —                 |
| <i>Loxophyllum spec.</i>       | —              | x             | —               | —              | —                 |
| <i>Paramaecium caudatum</i>    | —              | —             | —               | —              | x                 |
| <i>Oxytricha pellationella</i> | —              | —             | —               | —              | x                 |
| <i>Stylonychia mytilus</i>     | —              | —             | —               | —              | x                 |
| <i>Euplotes spec.</i>          | x              | —             | x               | —              | —                 |
| <i>Euplotes patella</i>        | x              | —             | x               | —              | —                 |
| <i>Euplotes charon</i>         | —              | —             | —               | —              | x                 |
| <i>Aspidisca spec.</i>         | —              | x             | —               | x              | —                 |
| <i>Aspidisca costata</i>       | x              | —             | x               | —              | x                 |
| <i>Halophrya ovum</i>          | —              | —             | x               | —              | —                 |
| <i>Vorticella spec.</i>        | x              | x             | —               | x              | —                 |
| <i>Vorticella convallaria</i>  | —              | —             | —               | —              | x                 |
| <i>Opercularia coarctata</i>   | —              | —             | x               | —              | x                 |
| <i>Epistylis spec.</i>         | x              | —             | —               | x              | —                 |
| <i>Carchesium spec.</i>        | —              | x             | —               | x              | —                 |
| <i>Podophrya fixa</i>          | x              | —             | —               | —              | x                 |

x = in großer Zahl vorhanden

x = in geringer Zahl vorhanden

— = nicht vorhanden

zahlen zwischen Reinigungseffekt und Ciliatenzahl konnten jedoch nicht gefunden werden.

KOLKWITZ (1926) und HAMBURG-EISENSTEIN (1933) stellten fest, daß das Auftreten polysaprober Organismen im Belebtschlamm mit einem verminderten Kläreffekt in Zusammenhang steht. Diese Beobachtung kann ich bestätigen. Bei meinen Versuchen traten bei starker Belastung (über 18 l/Tag) in zunehmender Menge polysaprobe Organismen auf, z. B. die Ciliaten *Glaucoma scintillans*, *Glaucoma pyriformis*, *Colpidium colpoda*, der Flagellat *Polytoma uvella* und die Amöbe *limax*. Ebenso zeigten Spirillen hierbei eine deutliche Zunahme.

Zahlreiche Untersuchungen haben zu der Erkenntnis geführt, daß starke Sphaerotilus-Entwicklung im Belebtschlamm zu Blähschlamm führt (KOLKWITZ 1926, SMITT 1934 u. a.).

Ein typischer Blähschlamm bildete sich bei meinen Versuchen bei mittlerer Belastung (6—8 l/Tag) und geringer Schlammkonzentration (etwa 2000 mg/l). Es zeigt sich, daß beim Schlammbelevungsverfahren bei geringer Schlammkonzentration der Betrieb der Anlagen bei mittlerer Belastung schwierig ist, eine Beobachtung, die in der Praxis nur beim Tropfkörperver-

fahren bekannt war. Der Blähschlamm war durch starkes Überhandnehmen von *Sphaerotilus natans* charakterisiert. Der Stärke des Blähens ging eine Abnahme der Ciliaten *Aspidisca costata*, *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria* parallel. Flagellaten und Amöben pflegten sich dagegen stärker zu entwickeln. Die Lebensgemeinschaft näherte sich der polysaprobe Zone, wobei die Zahl der Ciliaten im Blähschlamm auffallend gering war.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Verfolgt man die Art und Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft des Belebtschlammes, so ergeben sich für die Wirkungsweise der Anlagen wichtige Hinweise. Die qualitative Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft erlaubt Rückschlüsse auf den zu erwartenden Reinigungseffekt. Ein starkes Vorherrschen der Ciliaten *Aspidisca costata*, *Opercularia coarctata* und *Vorticella convallaria* spricht für einen wirksamen Belebtschlamm.

### Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Untersucht wurde die Bildung und Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft der belebten Flocke bei der Reinigung von städtischem und Molkereiabwasser unter besonderer Berücksichtigung der Eisenung des Abwassers. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Bei der Einarbeitung des Schlammes wirkt Eisen günstig auf die Flockenbildung. Die für den Reinigungseffekt wichtige Schlammkonzentration wird schneller erreicht als beim normalen Verfahren.
2. Nach der Einarbeitung des Schlammes besteht bei der Reinigung von städtischem Abwasser zwischen Eisenbelebtschlamm und normalem Belebtschlamm kaum ein Unterschied hinsichtlich der Reinigungswirkung und der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft. Bei beiden Verfahren beherbergt der Schlamm eine  $\alpha$ - bis  $\beta$ -mesosaprobe Lebensgemeinschaft, die neben Bakterienzoogloen vorwiegend wenige Ciliatenarten enthält.
3. Molkereibelebtschlamm mit einem Permanganatverbrauch des Rohabwassers von etwa 400 mg/l läßt sich mit dem normalen Verfahren bei einer Belastung von 3—4 l/l/Tag weitgehend reinigen. Bei Eisenzusatz zum Molkereiabwasser kann die Rohwasserkonzentration auf 800 mg/l Permanganatverbrauch bei gleicher Belastung wie ohne Zusatz und gleichem Reinigungseffekt gesteigert werden. Der Belebtschlamm beherbergt hierbei eine vorwiegend  $\alpha$ -mesosaprobe Lebensgemeinschaft, in der Ciliaten dominieren, die aber insgesamt bei weitem nicht die Individuenzahlen des Belebtschlammes aus städtischem Abwasser erreichen. *Sphaerotilus natans* tritt im Molkereibelebtschlamm in starker Entwicklung auf, weshalb dieser nicht so flockig ist wie Belebtschlamm aus städtischem Abwasser.

4. Ein Zusatz von 20 mg/l Ammoniak zum Molkereiabwasser übt eine verbessernde Wirkung auf den Belebtschlamm aus. Es bildet sich ein gut absetzbarer Schlamm, der eine günstig zusammengesetzte Lebensgemeinschaft aufweist.
5. Bei geringer Schlammkonzentration (bis 2000 mg/l) tritt bei mittlerer Belastung (6—8 l/Tag) Blähschlamm auf. Dieser ist durch starkes Überhandnehmen von *Sphaerotilus natans* charakterisiert. Die Zahl der Protozoen, besonders Ciliaten, ist im Blähschlamm sehr gering.
6. Bei hoher Schlammkonzentration (über 3000 mg/l) kann die Belastbarkeit des Verfahrens höher gesteigert werden, ohne daß Blähschlamm entsteht. Auch bei starker Belastung treten die Hauptformen der geringen Belastung als vorherrschende Species auf.
7. Die Protozoen werden durch einen Eisenzusatz von 40 mg/l in ihrer Entwicklung merklich eingeschränkt, während die Wasserbakterien durch Eisenzusatz gefördert werden. Auch die durch die Eisenflocken geschaffene vergrößerte Oberfläche ist der Bakterienentwicklung günstig.
8. Wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist (2 mg/l), geht mit einer Erhöhung der Schlammkonzentration eine Erhöhung der Cilienzahlen Hand in Hand. Dabei nehmen die Ciliaten beim normalen Verfahren schneller zu als bei dem Verfahren mit Eisenzusatz.
9. Zwischen Cilienzahlen und Durchsichtigkeit besteht ein ursächlicher Zusammenhang. Nimmt die Zahl der Ciliaten im Belebtschlamm zu, so steigt die Durchsichtigkeit des Anlagenabflusses.
10. Die Keimzahlen im Belebtschlamm sind abhängig von den Keimzahlen des Zulaufs. Auch die Keimzahlen des Anlagenabflusses zeigen noch eine Beziehung zu denen des Zulaufes.
11. Der Ciliat *Aspidisca costata* zeigt bei Einsetzen der Nitrifikation eine starke Vermehrungstendenz. Dabei tritt eine Modifikation auf, die durch überhöhte mittlere Dorsalrippen charakterisiert ist. Das Auftreten des Ciliaten *Paramaecium caudatum* ist von einer verstärkten Entwicklung des Sauginfusors *Podophrya fixa* begleitet.
12. Die Art und Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft erlaubt Rückschlüsse auf den zu erwartenden Reinigungseffekt. Treten im Belebtschlamm polysaprobe Organismen in größerer Zahl auf, so läßt dies auf einen verminderten Reinigungseffekt schließen.

#### Literaturverzeichnis

- BAHR, H.: Untersuchungen über die Rolle der Ciliaten als Bakterienvernichter im Rahmen der biologischen Reinigung des Abwassers. Zeitschr. f. Hygiene Jg. 139 (1954) S. 160—181.
- BAILY, S.: The mechanism of activated sludge process of sewage disposal. J. Soc. Chem. Ind. Jg. 50 (1931) S. 22—25.

- BAINES, S., H. A. HAWKES, C. H. HERITT und S. H. JENKINS: Protozoa as Indicators in Activated Sludge. *Sew. Ind. Wastes* Jg. 25 (1953) S. 1033—1039.
- BARITT, N. W.: The Ecology of Activated Sludge in Relation to its Properties and the Isolation of a specific soluble substance from the purified Effluent. *Annals of Applied Biology* Jg. 27 (1940) S. 151—156.
- BARKER, A. N.: Some Microbiological Aspects of Sewage Purification. *J. and Proceed. Inst. of Sew. Purific.* Jg. 1 (1949) S. 7—22.
- BEGER, H.: Biologische Reinigung in dünner Abwasserschicht. *Ges. Ing. Beih.* 15, Reihe 2, 1935.
- Leitfaden für die bakteriologische Trinkwasseruntersuchung. Berlin, München und Wien: Urban & Schwarzenberg 1952.
- BENDEL, H. L.: Das Pista-Eisenungsverfahren zur Wasser und Abwasserreinigung. *Ges.-Ing.* Jg. 72 (1951) S. 231—234.
- BRIX, I., K. IMHOFF und R. WELDERT: Die Stadtentwässerung von Deutschland. Bd. 2 Jena: G. Fischer 1934.
- BUSHWELL, A. M.: Removal of colloids from sewage. Circular 3 of State Water Survey-Division, Urbana III 1928. — Ref.: *Wasser u. Abwasser* Jg. 25 (1928) S. 53—54.
- BUSHWELL, A. M.: Activated Sludge Studies. *Bulletin* 18, Urbana, Illinois 1920—1922.
- EYFERT, B. und W. SCHOENICHEN: Einfachste Lebensformen der Tiere und Pflanzen. 5. Aufl., Berlin: 1925.
- EDDY, H. P.: Licht- und Schattenseiten der Abwasserreinigung mit aktiviertem Schlamm. *Ges.-Ing.* Jg. 45 (1922) S. 13—19.
- HAMBURG-EISENSTEIN, E.: Biologische Beobachtungen beim Schlammbelebungsverfahren. *Zentralblatt f. Bak., Parasitenk. u. Infektionskrankh.*, 1. Abt. 129 (1938/39) S. 143—165.
- HAUER, G. E.: Successful Treatment of Dairy Wastes by Aeration. *Sew. and Ind. Wastes* Jg. 24 (1952) S. 1271—1277.
- HETTICHE, H. O.: Die Verwendung von Kieselsäurenährböden bei bakteriologischen Untersuchungen von Wasser und Abwasser. *Zentralbl. f. Bak., Parasitenk. und Infektionskrankh.*, 1. Abt. 129 (1938/39) S. 143—165.
- HEUKELEKIAN, H. und H. GURBAXIAN: Effect of Certain Physical and Chemical Agents on the Bacteria and Protozoa of Activated Sludge. *Sew. and Ind. Wastes* Jg. 21 (1949) S. 800 bis 806.
- HOFFMANN, S.: Beitrag zur Biologie des Belebtschlammes. *Arch. f. Hygiene* Jg. 126 (1940) S. 175—209.
- HORASAWA, I.: Biological Studies on Activated Sludge in the Purification of Sewage. *J. Waterworks and Sew. Ass.* 12, 178, 1949 (Japan). *J. Waterworks and Sew. Ass.* 18, 8—12, 1949 (Japan).
- HORTON, I. und H. TREBLER: Recent Developments in Design of small Milk Waste Disposal Plants. *Sew. a. Ind. Wastes* Jg. 25 (1953) S. 941—949.
- IMHOFF, K.: Fortschritte in der Abwasserreinigung. 2. Aufl. München: Oldenbourg 1926.
- Taschenbuch der Stadtentwässerung. 15. Aufl. München: Oldenbourg 1954.
- JUNG, H.: Praktische Erfahrungen mit dem Niersverfahren bei der Reinigung gewerblicher Abwässer. *Jahrb. Vom Wasser* Jg. 14 (1940) S. 216—228.
- Erfahrungen der chemischen Abwasserreinigung. *Ges.-Ing.* Jg. 69 (1948) S. 305 bis 306.
- Die technische Entwicklung des Belebtschlammverfahrens. *Jahrb. Vom Wasser* Jg. 18 (1950) S. 207—219.
- KAHL, A.: Wimpertiere oder Ciliata (Infusorien). In: Dahl, *Die Tierwelt Deutschlands*. Jena: Gustav Fischer 1930, 1931, 1932, 1935.
- KEE, M. C.: Milk Waste Treatment by Aeration. *Sew. and Ind. Wastes* Jg. 22 (1950) S. 1041 bis 1044.
- KESSENER, H. und W. RUDOLFS: Belebtschlamm für Molkereiabwasser. *Sew. Works Journal* Jg. 6 (1934) S. 318—327.

- KOLKWITZ, R.: Zur Biologie des aktivierten Schlammes. Kl. Mitt. f. Mitgl. d. Vereins f. Wasser- Boden- und Lufthygiene 3, S. 70—74, 1926.
- KUISEL, F. H.: Über chemische und biologische Vorgänge beim Belebtschlammverfahren. Straße und Verkehr Jg. 26 (1940) S. 79—81.
- LIEBMANN, H.: Die Notwendigkeit einer Revision des Saprobien-systems und deren Bedeutung für die Wasserbeurteilung. Ges.-Ing. Jg. 68 (1947) S. 33—37.
- Zur Biologie des Tropfkörpers. Jahrb. Vom Wasser Jg. 17 (1949) S. 62—82.
- Handbuch der Frischwasser- und Abwasserbiologie. Bd. 1 München: Oldenbourg 1951.
- LOYD, L.L.: Animal life in Sewage Purification Processes. Sew. Works Journal Jg. 17 (1945) S. 1056.
- MÖHLE, H.: Das hochbelastete Belevungsverfahren auf der Kläranlage Wuppertal-Buchhofen. Gas- u. Wasserfach Jg. 96 (1955) S. 239—243.
- NOLTE, E.: Biologische Reinigung von Molkereiabwasser. Beitr. zur Wasser-, Abwasser- und Fischereichemie a. d. Flußwasseruntersuchungsamt Magdeburg, Heft 3 (1948) S. 9—25.
- PASCHER, A.: Die Süßwasserflora Mitteleuropas. Heft 1 (1912), Heft 3 (1913), Heft 12 (1925). Jena: Gustav Fischer.
- PHELPS, E. B. und I. C. BEVAN: A Laboratory Study of the Guggenheim Biochemical Process. Sew. Works Journal Jg. 14 (1942) S. 104—134.
- PILLAT, S. C. und V. SUBRAMANYAN: The role of Protozoa in Aerobic Purification. Nature 154 (1944) S. 179—180.
- REMY, T. und G. RÖSING: Über die biologische Reizwirkung natürlicher Humusstoffe. Zentralbl. f. Bak., Parasitenk. u. Infektionskrankh., 2. Abt. Jg. 30 (1911) S. 349—384.
- REYNOLDSON, T. B.: Vorticella as an Indicator of Activated Sludge. Nature Jg. 30 (1942) S. 149—150.
- SCHERB, K.: Die Beziehung des Ciliaten *Aspidisca costata* zur Nitrifikation im Belebtschlamm. Mikrokosmos Jg. 47 (1957) S. 4—9.
- SIERP, F.: In: Die Stadtentwässerung in Deutschland Bd. 2, S. 285—297. Jena: Gustav Fischer, 1934.
- In: Handbuch der Lebensmittelchemie. Bd. 8, S. 243. Berlin: Springer, 1939.
- Der Einfluß des Zinks auf die Abwasserreinigung. Jahrb. Vom Wasser 16 (1943) S. 72 bis 144.
- Die amerikanischen Einheitsverfahren zur Untersuchung von Wasser und Abwasser. München: Oldenbourg 1951
- SMITT, I.: Über die Ursachen des Aufblähens von Belebtschlamm. Arch. f. Mikrobiologie Jg. 5 (1934) S. 550—556.
- SUGDEN, B. und L. LOYD: The Clearing of Turbid Waters by Means of the Ciliat *Carchesium*. A Demonstration. Sew. and Ind. Wastes Jg. 22 (1950) S. 974.
- TAYLOR, H.: Some Biological Notes on Sewage Disposal Processes. The Surveyor Jg. 78 (1930) S. 33—35.
- TREBLER, H. A.: Dairy Wastes Disposal. Sew. Works Journal Jg. 10 (1938) S. 868. Ref. Wasser u. Abwasser Jg. 37 (1939) S. 68.
- VIEHL, K.: Über den Einfluß der Wasserstoffionenkonzentration auf die Wirksamkeit und Biologie des Belebtschlammes. Zentralbl. f. Bak., Parasitenk. u. Infektionskrankh., 2. Abt. Jg. 86 (1932) S. 34—43.
- Untersuchungen über das Wesen der Selbstreinigung und der künstlichen biologischen Reinigung des Wassers. Zeitschrift f. Hygiene Jg. 119 (1937) S. 383—412.
- Der Einfluß des Sauerstoffgehaltes auf den biochemischen Sauerstoffbedarf und auf die natürliche Selbstreinigung des Wassers sowie auf die Wirkungsweise des Belebtschlammes. Zeitschr. f. Hygiene Jg. 122 (1940) S. 533—549.
- Über den Einfluß der Temperatur auf die biologischen Umsetzungen im Wasser und Schlamm. Ges.-Ing. Jg. 71 (1950) S. 349—352.

- WAGNER, G.: Versuche über das biologische Prinzip in der Abwasserreinigung mit belebtem Schlamm. Festschr. 25 Jahre Technische Hochschule Danzig, 1929.
- WELDERT, R.: Der gegenwärtige Stand des neuen Abwasserreinigungsverfahrens mit belebten Schlamm. Kl. Mitt. d. Vereins f. Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung e. V. 3 (1926) S. 5—10.
- WINTER, E.: Die Reinigung städtischen Abwassers mittels Schlammbelebung. Ges.-Ing. Beih. 9, Reihe 2 (1931).
- WUHRMANN, K.: Ergebnisse von Großversuchen an hochbelasteten Belebtschlammmanlagen und Tropfkörpern. Schweiz. Zeitschr. f. Hydrologie Jg. 15 (1953) S. 1—93.

**Sonderabdruck aus „MIKROKOSMOS“ 47. Jahrgang  
Heft 1, Oktober 1957**

*Beilage*

siedelnden Wassermilben (sie gehören zu den Familien der Arrenurinae, Pionidae und Thyasinae) haben nach des Verfassers früheren Untersuchungen alle eine parasitische Larvenphase. So sind die Arrenuri in engerem Sinne als Wirte auf Libellen, alle übrigen Hydracarinae meist auf Mücken angewiesen. Wenn Wasserkäfer oder -wanzen an ihren Körpern die Ehippien von Wasserflöhen verschleppen, so liegt eine Zoophoresie nichtparasitärer Natur vor. Um eine solche handelt es sich auch, wenn die in unseren Untersuchungsgewässern nicht fehlenden Amphibien (Teichmolche, Wasserfrösche) beim Hinüberwechseln von einem Gewässer in ein anderes allerlei Aufwuchstiere mitführen. Auf dem Wege der Verschleppung durch Tiere dürfen auch die Würmer in die Trichter gelangt sein. Muscheln (*Musculium*, *Sphaerium* sp.) können so an den Beinen von Großkäfern oder Lurchen eingeschleppt worden sein. Schließlich ist an dem reichen Tierleben der Bombentrichter auch der Mensch nicht unbeteiligt. Hier sind es besonders Angehörige der Gilde der Aquarianer, die bewußt oder unbewußt für die Ausbreitung von Wasserorganismen sorgen. So sah ich wiederholt Bergleute in Buer-Hasseln, welche sich für ihre Fischzuchten aus den Bombenkratern und aus dem Pixmühlenteich Lebendfutter beschafften, und dabei in diesen Biotopen mit den gleichen

evident, daß die Verschleppung durch den Menschen bei der Verbreitung von makro- und mikroskopischen Land- und Wassertieren heute eine große Rolle spielt. Die weiter oben angegebenen Schnecken könnten in die Trichter auf dem Wege sowohl der Anthro- als auch der Zoophoresie gelangt sein. Die gleiche Annahme ist bei den in den Tümpeln nicht fehlenden Stichlingen (*Gasterosteus pungitius* L.) berechtigt. Bei den Schnecken übrigens ist nicht ausgeschlossen, daß deren Laich an den Ständern oder dem Gefieder von Wasservögeln in die Kratertümpel verschleppt worden ist.

Im offenen Gelände, wo ungehindert von Winden die Staubmassen der Uferländer aufgewirbelt werden können, kann auch die Ausbreitung der Wasserorganismen auf eine Anemophoresie zurückgeführt werden.

Die in dem Aufsatz zitierte Literatur findet sich in folgenden Veröffentlichungen des Verfassers zusammengestellt:

- a) Die tierische Besiedlung zehnjähriger Bombentrichter. Archiv für Hydrobiologie, Jg. 52, 185—203 (1956).
- b) Über die an *Limoniidae* und *Tipulidae* parasitierenden Milben-Larven. — Zeitschrift für Parasitenkunde 17, 330—338 (1956).
- c) Zwei bisher unbekannte Wassermilben aus einem Bombenkrater in Westfalen. — Mitt. d. Zool. Museums in Berlin. 31 (1955), 44—47.

## Die Beziehung des Ciliaten *Aspidisca costata* zur Nitrifikation im Belebtschlamm

Von Dr. Karl Scherb

(Aus der Bayerischen Biologischen Versuchsanstalt, München, Vorstand: Prof. Dr. H. Liebmann)

Bei Untersuchungen über die Lebensgemeinschaft des belebten Schlammes (München 1955) konnte beobachtet werden, daß Protozoen, insbesondere der Ciliat *Aspidisca costata*, gelegentlich in Zellgröße und Zellform stark variieren und dadurch erhebliche Abweichungen von den typischen Individuen der Art aufweisen. Diese Tatsache veranlaßte mich, der Frage der Formkonstanz dieser Organismen besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Die unter dem Begriff der Art zusammengefaßten Individuen sind bis zu einem gewissen Grade variabel. Jede Protozoenart ist in Merkmalen wie Zellgröße, Lage und Größe der Zellkerne und anderen Eigen-

schaften gewissen Schwankungen unterworfen. So sind nach LIEBMANN (1936) Größenunterschiede, Lage und Zahl der Makronuclei, Größe und Zahl der Vakuolen bei Ciliaten keine brauchbaren Artunterscheidungsmerkmale. Auch in morphologischer Hinsicht treten oft Verschiedenheiten auf. Nach KAHL (1930) ist die Zellform bei Protozoen zwar im allgemeinen sehr konstant, bei wechselnder Zufuhr von Nahrung oder bei ungewöhnlichen Lebensbedingungen unterliegt sie oft stärkeren Abweichungen, so daß man versucht sein könnte, abweichende Formen als selbständige Arten zu bezeichnen, vor allem dann, wenn man sie nicht durch kontinuier-



liche Übergänge mit der typischen Form verbunden findet. Die von LIEBMANN (1936, 1938), WETZEL (1925) u. a. festgestellten Formveränderlichkeiten bei Protozoen mahnen jedoch zur Vorsicht bei der Aufstellung neuer Arten. Wie WETZEL (1925) bei verschiedenen Faulschlammciliaten nachgewiesen hat, sind diese beträchtlichen Veränderungen durch Umwelteinflüsse unterworfen. LIEBMANN (1938) stellte bei den Untersuchungen in der Bleilochsperre eine überraschende Formveränderlichkeit bei verschiedenen Saproelciliaten fest. Manche der abweichenden Formen waren durch stufenweise Übergänge mit der typischen Form verbunden. STILLER (1942) fand bei peritrichen Ciliaten einiger Gewässer Ungarns Abweichungen von den typischen Individuen in der Körperform und der Stiellänge, und SCHRÖDER (1914) beobachtete bei Foraminiferen Varianten, die starke Abweichungen von den normalen Durchschnittstieren in der Form der Schale zeigten. Auch bei Radiolarien konnte HAECKER (1909) eine große Variabilität beobachten, wobei sich Varianten in Form und Größe der Skeletteile zeigten, die nach HAECKER vermutlich auf äußere Einflüsse zurückzuführen sind.

Innerhalb einer Population ist es oft schwer, sich ein Urteil über die Ursachen der Variation zu bilden. In manchen Fällen kann man zeigen, daß diese Variationen durch äußere Lebensbedingungen veranlaßt werden. So hat LIEBMANN (1936) den Ciliaten *Colpidium colpoda* aus Heuinfusionen in Becken mit abgestuften Schwefelwasserstoffkonzentrationen gebracht und weitergezüchtet. Dabei zeigte sich, daß die Tiere von ihrer sonst in den Heuinfusionen auftretenden plump-ovoiden Gestalt abwichen und in dem schwefelwasserstoffhaltigen Milieu eine mehr oder weniger fingerförmige Gestalt annahmen. In dieser Richtung von AUMANN (1953) fortgesetzte Untersuchungen ergaben, daß durch Schwefelwasserstoffeinfluß eine Zunahme der Körpergröße bei den Ciliaten *Lionotus cygneus* und *Frontonia elliptica* erfolgt. Parallel mit dem Größerwerden verläuft ein relatives Schmälerwerden der Tiere. AUMANN konnte Beziehungen der Protozoenvariabilität zu anderen Faktoren, z. B. Ammoniak feststellen, und LOEFER (1938) wies einen deutlichen Zusammenhang zwischen Größe und Wasserstoffionenkonzentration bei *Paramaecium bursaria* nach. Einen Einfluß der Temperatur auf die Größe verschiedener Ciliaten vermerken ZINGHER (1935) sowie ZINGHER und NARBUTT (1932). Weiter stellte ZINGHER (1935) bei einigen Ciliatenarten fest, daß Form und Größe in Zusammenhang mit dem Nahrungsangebot äußerst variabel sind. Bei günstiger Ernährung zeigte *Pa-*

*ramaecium caudatum* eine Gestalt, die ZINGHER kübelförmig nennt, gegenüber der sonst charakteristischen pantoffelähnlichen Form, und vielfach Riesenwuchs. An Meeresciliaten wurden von KIESELBACH (1939) Untersuchungen angestellt. Sie zeigten, daß die Tiere in Hungerkulturen eine wesentlich andere Gestalt aufweisen wie

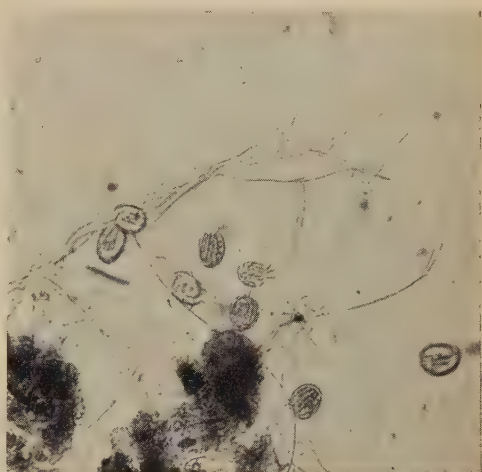


Abb. 1: *Aspidisca costata* zwischen Belebtschlammflocken. Vergr. 350fach

bei normaler Fütterung. Neben der Veränderung der Körperform ging auch eine Veränderung des Makronucleus einher. Durch Schaffung extremer Umweltbedingungen, wie z. B. Zugabe von Arsen, Alkohol und anderer Stoffe konnten monströse Formen (Anomalien) erzielt werden. Durch die extremen Lebensbedingungen wurde

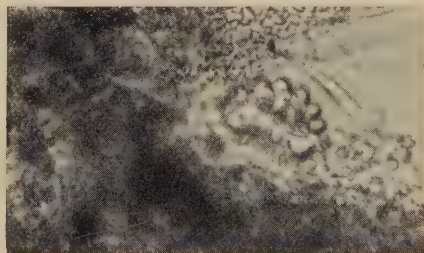


Abb. 2: *Aspidisca costata*. Tier mit sechs Dorsalrippen. Vergr. 1200fach

die normale Korrelation, die zwischen Makro- und Mikronucleus und Plasma vorhanden ist, gestört. Nach Aufhören der auslösenden Reize behielten die Versuchstiere ihre Gestalt noch während einer Reihe von Teilungsfolgen bei. Maximal betrug die Zeit vier Wochen.



Veränderungen, die durch Einflüsse der Außenwelt auf die Tiere hervorgerufen werden, bezeichnet man als Modifikationen. Zu ihnen gehören die eingangs erwähnten Standortsvarietäten. Sie betreffen nur die Erscheinungsform, den Phänotypus, und zeichnen sich dadurch aus, daß sie nach Aufhören des auslösenden Reizes früher oder später wieder verschwinden. Bleibt eine Modifikation über mehrere Generationen erhalten, so liegt eine Dauermodifikation vor. Modifikation und Dauermodifikation beruhen auf der gleichen Grundlage; in beiden Fällen handelt es sich um eine durch Umwelteinflüsse hervorgerufene Umstimmung des Cytoplasmas (SCHUCKMANN und PIEKARSKY 1940). Prinzipiell verschieden von Modifikationen sind die Mutationen, bei denen es sich um eine Änderung des Genotypus handelt. Die auf Mutationen beruhenden Abweichungen bleiben dauernd erhalten.

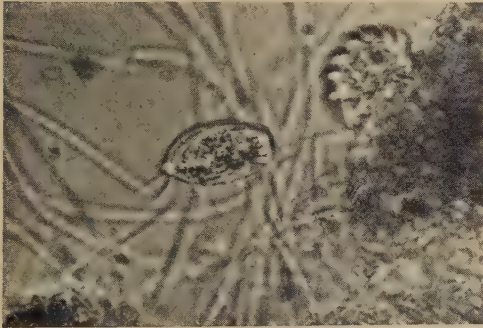


Abb. 3: *Aspidisca costata*. Rechts Tier mit sieben Dorsalrippen. Vergr. 1200fach. Abb. 1—3 stellen die Normalform dar.

Zusammenfassend ergibt sich aus den Beispielen der Literatur, daß Veränderungen der Körperform bei Protozoen durchaus keine Seltenheit darstellen. Sie sind meist von äußeren Einflüssen, z. B. vom umgebenden Milieu, von besserer oder schlechterer Ernährung, von Temperatur, Jahreszeit und anderen Faktoren abhängig. Oft beruhen sie auf bis jetzt noch nicht näher geklärten Ursachen.

Bei meinen Versuchen über die Lebensgemeinschaft des belebten Schlammes konnten wiederholt Formänderungen bei verschiedenen Ciliaten, besonders bei *Chilodonella cucullata*, *Oxytricha pelliionella*, *Euplotes charon* und *Aspidisca costata* festgestellt werden. Im folgenden soll auf die Variabilität von *Aspidisca costata* näher eingegangen werden, weil diese häufig ausgeprägt ist und wiederholt beobachtet wurde. Der Ciliat *Aspidisca costata* wurde zu allen Jahreszeiten als einer der häufigsten Ciliaten

zwischen den Belebtschlammflocken gefunden (Abb. 1—3).

#### Art diagnose:

*Aspidisca costata* ist ein hypotricher Ciliat von 25—40  $\mu$  Größe (KAHL 1932); bei über 100 Messungen zu verschiedenen Zeiten konnte ich im Belebtschlamm eine Größe von 25—36  $\mu$  feststellen. Die Gestalt des Tieres ist eiförmig bis rundlich, ventral flach, dorsal stark gewölbt mit 6 Dorsalrippen, wobei sich die Rippen durch große Gleichmäßigkeit auszeichnen (Abb. 2). Gelegentlich konnten im Belebtschlamm auch Tiere mit 7 Dorsalrippen angetroffen werden (Abb. 3), eine Beobachtung, die KAHL (1932) nicht erwähnt. Nach WETZEL (1925) ist es schwer zu sagen, ob solche Bildungen durch lokale Verdickung der Pellicula zustandekommen oder nur Unebenheiten derselben darstellen. Die rippenartigen Vorwölbungen werden auch als Einrichtungen zur Versteifung aufgefaßt. Dem hufeisenähnlichen Makronucleus liegt ein kleiner runder Mikronucleus an. Ventral besitzt das Tier 7 Stirn- und 5 Aftercirren.

Der Ciliat *Aspidisca costata* war bei meinen Versuchen dann im Belebtschlamm besonders zahlreich zu finden, wenn starke Nitrifikation einsetzte. Er trat dabei mit solcher Regelmäßigkeit und Häufigkeit auf, daß man geradezu von einem *Aspidisca*-Stadium des Belebtschlammes sprechen kann. Bei dieser Massenentwicklung des Ciliaten tauchten mitunter Formen auf, die zwar die Merkmale der Art *Aspidisca costata* aufwiesen, aber infolge ihrer eigenartigen Rippenbildung von der Normalform erheblich abwichen. Die abweichenden Formen zeigten stark überhöhte mittlere Dorsalrippen (Abb. 4). Dabei hatten die zwei mittleren Dorsalrippen im Durchschnitt eine Höhe von 3—4  $\mu$  gegenüber 1—1,5  $\mu$  der Normalformen. Manchmal zeigten noch weitere Rippen die Eigenart der Überhöhung, so daß ganz ungleichmäßig berippte Tiere zustandekamen. Die nicht überhöhten Rippen der veränderten Tiere wiesen manchmal eine mehr spitze Form, in anderen Fällen mehr die sonst übliche runde Form auf. Außer dieser morphologischen Abänderung ließ sich keine Veränderung der Tiere feststellen. So erwies sich der Makronucleus als sehr formkonstant und zeigte keine Abweichung von der Normalform. Die Ausbildung einer Modifikation trat oft innerhalb von 24 Stunden ein. Manchmal konnten an den Tieren bereits am Tage vorher Andeutungen dieser Formänderung beobachtet werden. Nach LIEBMANN (1951) hängt die Rippenausbildung des Ciliaten *Aspidisca costata* von den Nitrit-Nitrat-Verhältnissen im Abwasser ab. Deshalb achtete ich besonders während der Nitrifikation im Belebtschlamm auf die Gestalt des Ciliaten. Die ersten Un-



tersuchungen lieferten jedoch kein klares Ergebnis, weil trotz längere Zeit anhalten-der Nitrifikation im Belebtschlamm keine Tiere mit überhöhten Rippen gefunden werden konnten. Ich prüfte deshalb auch Sauerstoffgehalt, Wasserstoffionenkonzentration, Temperatur und Einfluß der Jahreszeit auf ihre modifizierende Wirkung. Durch Versuch stellte ich fest, daß Änderungen des Sauerstoffgehaltes im Belebungsbecken keinen Einfluß hatten. Auch die erwähnten anderen Faktoren bewirkten nicht die Ausbildung überhöhter Rippen.

In den Belebtschlammversuchen waren abweichende Formen stets bei der Einarbeitung der Anlagen und bei Versuchen, die sehr hohe Nitritwerte aufwiesen, zu finden. Bei der Einarbeitung des Belebtschlammes erfolgte im allgemeinen eine erhebliche Nitritbildung. Nach Ablauf dieser Zeit wurden jedoch kaum noch nennenswerte Nitritmengen, dagegen meist nur noch höhere Nitratwerte ermittelt. Für weitere Untersuchungen der Modifikationsursache galt es zunächst, folgende Fragen zu beantworten: Durch welche Bedingungen wird die Nitritbildung in den Anlagen gefördert? Ist es möglich, die Nitrifikation in einzelnen Phasen stufenweise verlaufen zu lassen? Durch Versuch stellte ich fest, daß eine Herabsetzung der Belüftung eine gewisse Zerlegung der Prozesse Nitrit- und Nitrat-Bildung ermöglichte. Allerdings tauchte bei dieser Maßnahme die Schwierigkeit auf, daß der Schlamm nicht mehr genügend in Schwebelage gehalten wurde und teilweise am Boden liegenblieb und faulte. Bei den weiteren Versuchen hielt ich daher die Schlammkonzentration im Belüftungsbecken möglichst gering. Bei geringer Schlammkonzentration und geringer Belüftung ließ sich ein höherer Nitritgehalt erreichen (5 mg/l). Am einfachsten aber gelangte ich zu einer ausgeprägten Nitritphase, wenn ich die Anlagen einfach neu einarbeiten ließ. Neben relativ wenig Nitrat wurde dabei stets viel Nitrit vorgefunden (10 mg/l). Bei herabgesetzter Nitratbildung und erheblicher Nitritbildung konnte ich regelmäßig bei *Aspidisca costata* überhöhte mittlere Dorsalrippen beobachten. Durch genaues Festhalten ihres ersten Auftretens sowie der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Nitrit- und Nitratwerte ergab sich eine Beziehung, die sich zwar nicht in absoluten Werten (mg/l), aber in Verhältniszahlen ausdrücken läßt. Zur Ausbildung überhöhter Rippen kam es, wenn:

1. die Nitrifikation mit ihren Nitrit-Nitrat-Werten eine gleichsinnig ansteigende Tendenz aufwies.
2. Nitrit- zu Nitratmenge im Verhältnis von etwa 1:6 vorhanden war.

3. 24 Stunden vor dem Auftreten überhöhter Rippen das Verhältnis von Nitrit zu Nitrat wie 1:3 war.

Diese Ergebnisse, die in Abb. 5 graphisch dargestellt sind, wurden durch mehrere Versuche bestätigt. Die tatsächlichen Werte, bei denen das Auftreten der Modifikation zu beobachten war, sind in Tab. 1 aufgeführt.

| Versuch                      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1. Tag: NO <sub>2</sub> mg/l | 2    | 2,8  | 7,2  | 1,2  | 2,1  | 3,2  | 6,4  |
| NO <sub>3</sub> mg/l         | 6    | 8,5  | 21,0 | 4,0  | 6,0  | 10,0 | 15,0 |
| 2. Tag: NO <sub>2</sub> mg/l | 4,5  | 5,0  | 8,0  | 5,0  | 3,3  | 7,4  | 12,0 |
| NO <sub>3</sub> mg/l         | 28,0 | 30,0 | 45,0 | 30,0 | 21,0 | 45,0 | 70,0 |

Tabelle 1: Nitrit- und Nitratwerte beim Auftreten überhöhter mittlerer Dorsalrippen bei *Aspidisca costata*

Die Abweichung von der Normalform ließ sich im Belebtschlamm bei fast allen Versuchen 2—3 Wochen verfolgen, wobei die Tiere diese Eigenart beibehielten, ganz gleich, ob die oben geschilderten Verhält-

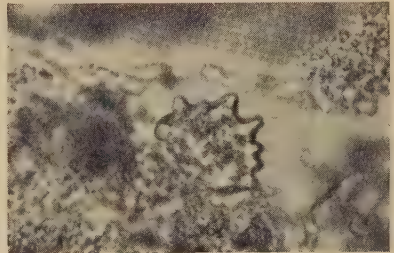


Abb. 4 a: *Aspidisca costata*. Vergr. 1200fach

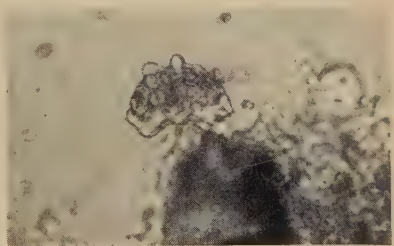


Abb. 4 b: *Aspidisca costata*. Vergr. 1200fach. Abb. 4 a und 4 b stellen Modifikationen dar.

niszahlen weiter auftraten oder nicht. Langsam stellten sich nach einer Woche zunehmend Normalformen ein. Nach 8 Tagen hatten etwa 25 % der Tiere bereits die Normalform, nach knapp 2 Wochen waren es 50—60 %.

Um näheren Einblick in das Wesen und die Dauer der Modifikation zu erlangen, war es erforderlich, das Schicksal einzelner Individuen genauer zu verfolgen. Zu diesem Zweck wurden einzelne Individuen in Petrischalen und hohlgeschliffenen Objektträgern, die in einer feuchten Kammer aufbewahrt wurden, beobachtet. Die Versuche sollten auch über das Verhalten der Tiere



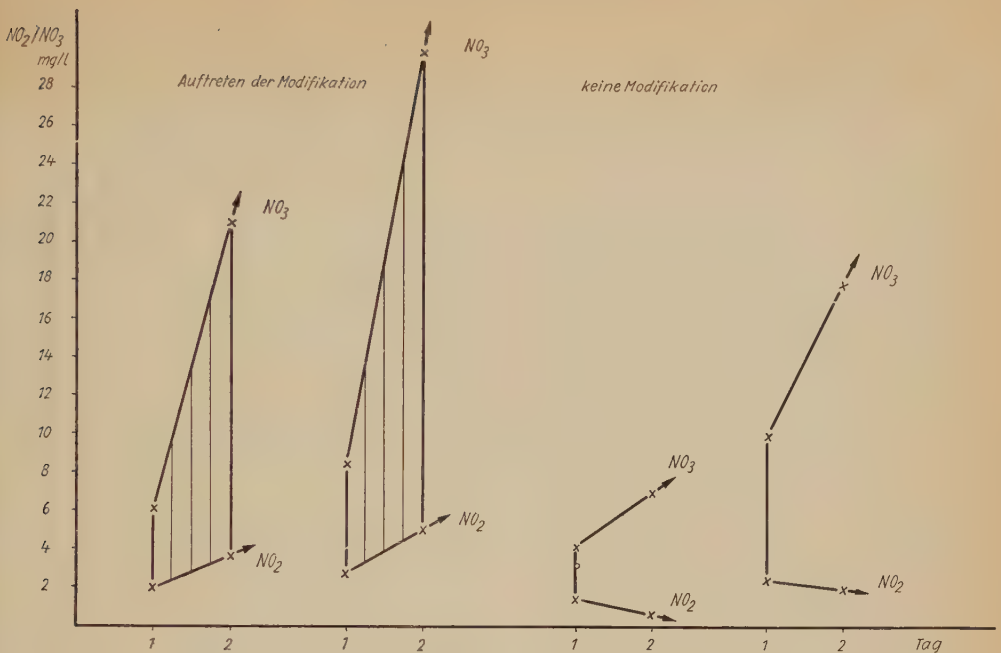


Abb. 5: Erklärung im Text

nach Konjugation Aufschluß geben. Dabei konnte festgestellt werden, daß diese Modifikation sich bei abweichenden chemischen Bedingungen bei den meisten Tieren bis zu 16 Tagen erhält, bei einzelnen sogar noch ein bis zwei Tage länger. Diese Ergebnisse zeigen, daß es sich bei der überhöhten Rippenbildung von *Aspidisca costata* um eine Dauermodifikation und nicht um eine Mutation handelt. Bei Versuchen zur Feststellung der Teilungsfrequenzen konnten keine übereinstimmenden Werte erzielt werden. Im Durchschnitt schwankten die Ergebnisse zwischen 1 und 5 Teilungen pro Tag. Also würde sich die Modifikation minimal 16 und maximal 80 Generationen erhalten. Selbst bei Konjugation konnte zweimal beobachtet werden, daß nach Trennung der Tiere die überhöhten Rippen erhalten blieben. Daraus ist zu schließen, daß Konjugation die Modifikation nicht beeinflusst.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde geprüft, ob sich durch künstlichen Zusatz von Nitrit (Natriumnitrit) und Nitrat (Natriumnitrat bzw. Magnesiumnitrat) solche Modifikationen hervorrufen ließen. Die Salze wurden den Kulturen in denselben Mengen zugesetzt, wie sie bei den Versuchen bei Auftreten der Modifikation zu finden waren. Hierbei konnten niemals Modifikationen beobachtet werden. Weitere Untersuchungen zur Aufklärung der Modifikations-Ursache wurden in zwei kleinen Belebtschlammbecken durchgeführt, deren

Schlamm die Ciliaten enthielt, aber kein Nitrit bzw. Nitrat bildete. Aus zwei Büretten ließ ich die gelösten Salze (Nitrit bzw. Nitrat) kontinuierlich in die Belebtschlammbecken zutropfen. Auf diese Weise konnte innerhalb von 24 Stunden das Nitrit-Nitrat-Verhältnis im Schlamm von 1:3 allmählich auf 1:6 gesteigert werden, also der Naturversuch, der zur Auslösung der Modifikation führte, in chemischer Hinsicht gut nachgeahmt werden. Trotz mehrmaliger Wiederholung der Versuche konnten auch hierbei keine Modifikationen erzielt werden. Daraus ist zu schließen, daß der Chemismus allein nicht für die Dauermodifikation verantwortlich ist; vielmehr kann man annehmen, daß sie von der Menge der nitrifizierenden Bakterien, die *Aspidisca costata* vermutlich als Nahrung dienen, abhängt. Während der Abbau der organischen Substanz durch sehr viele Bakterienarten durchgeführt wird, sind zur Nitrifikation nur wenige Bakterienarten befähigt, und zwar *Nitrosomonas*- und *Nitrobacter*-Arten. Das häufige Auftreten des Bakterienfressers *Aspidisca costata* während der Nitrifikation läßt vermuten, daß dieser Ciliat hauptsächlich von nitrifizierenden Bakterien lebt.

#### Zusammenfassung:

1. Im Belebtschlamm konnte festgestellt werden, daß sich unter bestimmten Verhältnissen bei dem Ciliaten *Aspidisca costata* eine Modifikationsform ausbil-



- det, die durch überhöhte mittlere Dorsalrippen charakterisiert ist. Die Modifikation tritt dann auf, wenn ein bestimmtes Verhältnis von Nitrit zu Nitrat (1:3—1:6) vorhanden ist und sowohl der Nitrit- als auch der Nitratgehalt eine ansteigende Tendenz aufweisen.
2. Durch künstlichen Zusatz von Nitrit und Nitrat in vitro ließ sich das Auftreten der Modifikation nicht hervorrufen.
  3. Nachdem diese Versuche negativ ausgefallen sind, liegt der Schluß nahe, daß die Modifikation primär nicht vom Nitrit-Nitrat-Verhältnis abhängt, sondern von der Menge der nitrifizierenden Bakterien, die *Aspidisca costata* vermutlich als Nahrung dienen.
  4. Bei Isolierung des Ciliaten zeigte sich, daß erst nach 16—80 Generationen wieder eine Rückkehr zur Ausgangsform erfolgt. Es handelt sich also um eine Dauermodifikation.

Teilergebnis der Dissertation „Zur Biologie des belebten Schlammes“ der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität München, 1956.

#### Literatur:

1. Aumann, G.: Ökologie der freilebenden Ciliaten der Schwabach unter besonderer Berücksichtigung der verschiedenen Verbreitungsfaktoren. Diss. Erlangen 1952.
2. Ehrenberg, C. H.: Die Infusionstiere als vollkommene Organismen. Leipzig 1838.
3. Haecker, V.: Die Radiolarien in der Variations- und Artbildungslehre. Abst. u. Vererbungslehre 2, 1—13, 1909.
4. Jollos, V.: Experimentelle Protistenstudien. 1. Untersuchungen über Variabilität und Vererbung. Arch. f. Protistenk. 43, 1—222, 1921.
5. Jollos, V.: Dauermodifikation und Mutationen bei Protozoen. Arch. f. Protistenk. 83, 197, 1934.
6. Kahl, A.: Wimpertiere oder Ciliata (Infusorien). 1. Allgemeiner Teil und Protostomata. 3. Spirotricha. DAHL: Die Tierwelt Deutschlands 1930, 1932.
7. Kieselbach, A.: Das Verhalten einiger mariner Ciliaten bei normalen und veränderten Umweltbedingungen. Thalassia 3, Nr. 6, 1939.
8. Liebmänn, H.: Biologie und Chemismus der Blei-ochsperre. Zugleich ein Beitrag zur Frage der Wirkung von Abwässern aus Sulfatzellulosefabriken auf stehende Gewässer. Arch. f. Hydrobiol. 33, 1—81, 1938.
9. Liebmänn, H.: Weitere Beiträge zur Kenntnis der Protozoen der Blei-ochsperre. Arch. f. Protistenk. 90, 273—290, 1938.
10. Liebmänn, H.: Handbuch der Frischwasser- und Abwasserbiologie. Bd. 1 Verl. Oldenbourg, München 1951.
11. Loefer, I.: Effect of hydrogenium concentration on the growth and morphology of *Paramecium bursaria*. Arch. f. Prot. 90, 185—194, 1938.
12. v. Schuckmann, W.: Beitrag zum Problem der Dauermodifikation bei Protozoen. Arch. f. Protistenk. 92, 355—416, 1939.
13. Stiller, J.: Einige Gewässer der Umgebung Szeged und ihre Peritrichenfauna. Arch. f. Hydrobiol. 38, 313—435, 1942.
14. Wetzel, A.: Der Faulschlamm und seine Ciliaten Leitformen. Zeitschr. f. Morph. u. Ökologie d. Tiere 13, 179—328, 1928.
15. Zingher, I. A.: Über die Wirkung der Temperatur und der Lichtes auf die Größe und die Teilung von *Paramecium caudatum* u. *Stylonychia postolata*. Arch. f. Prot. 77, 482—487, 1935.

## Haftvorrichtungen an Fischeiern und Fischlarven

Von Dr. Wolfgang Wickler, Weidenau

Es gibt eine ganze Anzahl Fische, die von der ursprünglichen Methode der Fortpflanzung, im Schwarm Eier und Samen-

zellen einfach ins Wasser zu entleeren, abgekommen sind; am weitesten die wenigen lebendgebärenden Formen, deren Eier im

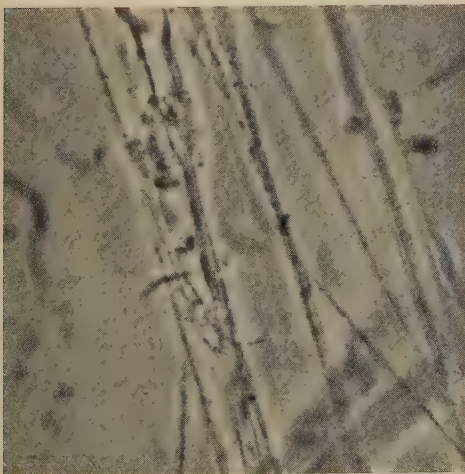


Abb. 1: Haftfäden an einem Cichliden-Ei (*Geophagus brasiliensis*); a) im Wasser, b) in Aufsicht auf die Eihülle



## L e b e n s l a u f

Am 17. Juni 1927 wurde ich, Karl Scherb, als Sohn des Herrn Georg Scherb und seiner Ehefrau Babette, geb. Gundel, in Weihenzell/Mittelfranken geboren.

Meine Jugend- und Schulzeit verbrachte ich in Ansbach. Von 1933 bis 1937 besuchte ich die Volksschule und anschließend die Oberrealschule, die ich im September 1943 auf Grund der Einberufung zum Wehrdienst verließ. Nach Rückkehr aus der Kriegsgefangenschaft erwarb ich im März 1947 das Reifezeugnis der Oberrealschule Ansbach.

Das Studium der Naturwissenschaften (Biologie und Chemie) begann ich im S.S. 1948 an der Phil.-theol. Hochschule in Eichstätt. Im W.S. 1948/49 wechselte ich an die Ludwig-Maximilians-Universität München über, an der ich bis 1953 eingeschrieben war. In dieser Zeit besuchte ich Vorlesungen und Übungen bei den Herren Professoren Beutler, Demoll, v. Frisch, Gistel, Huber, Jacobs, Kahmann, Liebmann, Renner, Schmeißer, Wiberg, Wille und Zwölfer.

Von November 1952 bis Juli 1955 widmete ich mich der Durchführung der vorliegenden Arbeit an der Bayer. Biologischen Versuchsanstalt München.





